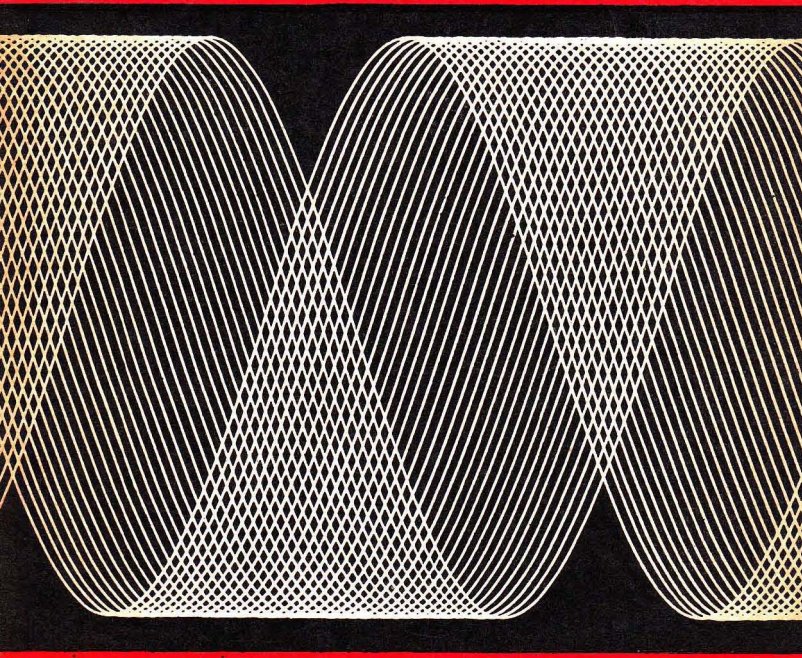
DER PRAKTISCHE FUNKAMATEUR



Otthermann Kronjäger

Amateurtechnik und Betriebszuverlässigkeit

Der praktische Funkamateur · Band 80

Amateurtechnik und Betriebszuverlässigkeit

OTTHERMANN KRONJÄGER

Amateurtechnik und Betriebszuverlässigkeit

DEUTSCHER MILITÄRVERLAG

Redaktionsschluß: 16. 8. 1968

1.—15. Tausend
Deutscher Militärverlag · Berlin 1969
Lizenz-Nr. 5
Lektor: Sonja Topolov
Zeichnungen: Gisela Michael
Typografie: Helmut Herrmann
Vorauskorrektor: Ingeburg Zoschke · Korrektor: Rita Abraham
Hersteller: Werner Briege
Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme, Potsdam
1,90

Inhaltsverzeichnis

1.	**Einleitung**	7
2.	**Begriffe der Betriebszuverlässigkeit**	8
2.1.	Etwas zur Wahrscheinlichkeit	8
2.2.	Verteilungs- und Dichtefunktion	9
2.3.	Was ist Betriebszuverlässigkeit?	11
2.4.	Die Ausfallrate	12
2.4.1.	Der Zeitabschnitt mit $\alpha < 1$	15
2.4.2.	Der Zeitabschnitt mit $\alpha \approx 1$	17
2.4.3.	Der Zeitabschnitt mit $\alpha > 1$	21
2.4.4.	Überlagerung verschiedener Ausfallursachen	22
2.5.	Einige Bemerkungen zur mittleren Funktionsdauer	24
3.	**System und Element im Zusammenhang**	26
3.1.	Zur Praxis der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten	30
3.2.	Weitere Hinweise zur Ermittlung der Zuverlässigkeit hinsichtlich der Abhängigkeit der Ausfallrate	31
4.	**Beispiele zur bisherigen Thematik**	35
	Beispiel 4.1.	35
	Beispiel 4.2.	35
	Beispiel 4.3.	35
	Beispiel 4.4.	36
	Beispiel 4.5.	36
	Beispiel 4.6.	37
	Beispiel 4.7.	37
	Beispiel 4.8.	38
	Beispiel 4.8.1.	39
	Beispiel 4.8.2.	40
	Beispiel 4.8.3.	40
5.	**Hinweise zur Redundanz**	41
5.1.	Was ist Redundanz, wann ist sie notwendig?	41

5.2. Redundante Anordnungen 42
5.2.1. Heiße Reserve 42
5.2.2. Kalte Reserve 44
5.3. Bauelementeredundanz 46

6. Verfügbarkeit 49

7. Zusammenstellung von Ausfallursachen 52
7.1. Ursachen, die zu einem Toleranzausfall führen . 52
7.2. Ursachen, die zu plötzlichen Ausfällen führen .. 54
7.3. Lagerung 54

8. Maßnahmen zur Entwicklung und Konstruktion zuverlässiger Geräte 56
8.1. Gesichtspunkte im Entwicklungsablauf 56
8.1.1. Schaltung und Zuverlässigkeit 57
8.2. Maßnahmen bei der Konstruktion 58
8.2.1. Zum Aufbau der Baugruppen 58
8.2.2. Das Äußere 59

9. Betriebszuverlässigkeit unter militärischen Gesichtspunkten 60

10. Zuverlässigkeit und Amateurtechnik 63
10.1. Zuverlässigkeit in der Praxis des Amateurs 64
10.2. bis 10.2.2. Beispiele zur Ermittlung der Ausfallrate 65
10.2.3. Die mittlere Funktionsdauer von Geräten 68

11. Auswertung von Prüfergebnissen 70
11.1. Ermittlung von Parametern verschleißbehafteter Bauelemente 70
11.2. Ermittlung der Frühausfälle 71
11.3. Ermittlung der praktischen Funktionsdauer ... 71

12. Übersicht der verwendeten Formelzeichen 74

13. Diagramme und Erläuterungen 75

14. Literaturhinweise 96

1. Einleitung

Zunächst seien einige immer wiederkehrende Fachausdrücke zur Problematik der Betriebszuverlässigkeit erörtert.
Im Vordergrund steht dabei stets die Notwendigkeit der Anwendung von Erkenntnissen zur Betriebszuverlässigkeit in der modernen Elektronik. An Hand von Beispielen werden Begriffe, wie *Ausfallrate, Systemzuverlässigkeit* u. a., dem Leser verständlich. Dazu gehören auch die verschiedenen Arten der *Redundanz*, wobei die *Bauelementeredundanz* für den Amateur besonders interessant ist. In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, daß es wünschenswert wäre, wenn sich breiteste Kreise von Mitarbeitern auf elektronischem Gebiet in der Volkswirtschaft und bei der NVA mit dem Gedanken der Betriebszuverlässigkeit vertraut machten.
In Abschnitt 6. „Verfügbarkeit" werden Anwender und Hersteller gegenübergestellt und die verschiedenen Ausfallursachen genannt. Eine Auswahl von Merksätzen gibt Amateuren und Fachleuten praktische Hinweise für den Bau zuverlässiger Geräte.
Zum Schluß werden Ergebnisse von Prüfungen im Zusammenhang mit Zuverlässigkeitsparametern vorgestellt. Eine große Anzahl von Diagrammen wird die Rechenarbeit außerordentlich erleichtern.

2. Begriffe der Betriebszuverlässigkeit

In jedem Zweig der Wissenschaft oder Technik sind Fachausdrücke als Bindeglied zwischen Theorie und Praxis notwendig. Nicht immer handelt es sich um „genormte" Begriffe, und in der umfangreichen Fachliteratur können sich verschiedene Ausdrücke zum gleichen Problem finden. Zur Einarbeitung in die Problematik sind deshalb unbedingt Definitionen erforderlich. In Zweifelsfällen hilft jedoch die Mathematik bei der Lösung der Aufgabe.

2.1. Etwas zur Wahrscheinlichkeit

Die Betriebszuverlässigkeit ist allgemein als *Wahrscheinlichkeitsbegriff* zu werten. Dazu sei vom Ausdruck

$$W = \frac{\text{günstige Fälle}}{\text{mögliche Fälle}} \tag{1}$$

ausgegangen. Darin sind die *günstigen Fälle* solche, die wirklich eintreffen, und die *möglichen Fälle* solche, die eintreten können. Diese Definition der Wahrscheinlichkeit entspricht der in der Mathematik. Es seien nun zum besseren Verständnis von Gl. (1) einige Beispiele aus dem täglichen Leben angeführt. Die Zahl 6 zu würfeln, hatte bei den Spielen aus der Kindheit eine beträchtliche Bedeutung. Wir fragen uns deshalb, welche Wahrscheinlichkeit besteht, mit dem Wurf eine 6 zu würfeln. Wir erkennen sogleich, daß die Ausdrucksweise der Wahrscheinlichkeitsrechnung für uns Techniker ungewohnt ist. Denn wenn man Gl. (1) anwenden soll, was ist dann *günstig*? Es gibt nur einen Fall, die 6 zu würfeln, aber möglich ist es, sowohl die 1, 2, 3, 4, 5 oder 6 zu würfeln. Demnach wäre $W = \frac{1}{6}$. Die Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{6}$ bestände auch für jede andere Zahl, weil die möglichen Fälle immer 6 und der günstige Fall eine 1, 2, 3, 4, 5 oder 6 für alle Zahlen zutrifft. Es ist klar, daß mit einem Wurf nur die eine oder andere Zahl ge-

würfelt werden kann, also ein zufälliges Ereignis E, die 1 oder z. B. die 4 gewürfelt zu haben. Wir wollen 2 Regeln durch Beispiele andeuten. Mit einem Spielwürfel eine 2, 4 oder 6 zu würfeln, ergibt die Wahrscheinlichkeit $W(2 + 4 + 6) = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{3}{6} = 0{,}5 = 50\,\%$. Es kam das sogenannte Additionsgesetz zur Anwendung. Und das obige Ergebnis zeigt, daß eine höhere Wahrscheinlichkeit besteht, mit einem Wurf eine der 3 genannten Zahlen zu würfeln als eine einzelne Zahl. Bei der Multiplikation von Wahrscheinlichkeiten, die große Bedeutung für unsere Thematik haben, gehen wir davon aus, daß voneinander unabhängige Ereignisse gleichzeitig eintreffen können. Am Beispiel von 2 Spielwürfeln, mit denen man z. B. die gleiche Zahl würfeln soll, wird die resultierende $W_{ges} = \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} = \frac{1}{36}$ deutlich. Es ist natürlich einzusehen, daß mit 2 Würfeln gleichzeitig je eine 6 zu würfeln, unwahrscheinlicher sein dürfte.

Es ist unmöglich, im Rahmen dieser Broschüre ausführlich über die Zusammenhänge der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu berichten. Da wir aber immer wieder auf den Begriff der Wahrscheinlichkeit zurückkommen, sollte mittels einiger kleiner Beispiele eine gewisse Handhabung angedeutet werden.

Uns interessiert ab jetzt die Wahrscheinlichkeit, die in Abhängigkeit zur Zeit steht. Das drückt sich in W (t) aus. Ihr Wert schwankt zwischen 0 bis 1. Ist W (t) = 1, so tritt das Ereignis sicher ein (100%), beträgt sie dagegen 0, so tritt es sicher nicht ein. Daraus läßt sich eine Beziehung ableiten, die besagt, daß sich die entgegengesetzten Wahrscheinlichkeiten zu 1 ergänzen. Demnach ist

$$W + W' = 1 . \tag{2}$$

2.2. Verteilungs- und Dichtefunktion

In der Technik findet man oft, daß sich unter gleichen Versuchsbedingungen bei jeder Messung das Ergebnis vom vorherigen unterscheidet. Diese sogenannten Zufallsgrößen X

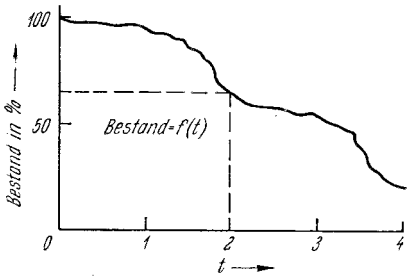


Bild 1

sind jedoch nach gewissen Gesetzmäßigkeiten verteilt. Hierzu gibt es bereits eine Reihe von Verteilungsfunktionen, die man nach den jeweiligen Versuchsergebnissen annähern, eventuell sogar direkt übernehmen kann. Nehmen wir zur Illustration ein praktisches Beispiel. Gemäß Bild 1 tragen wir auf der Abszisse die Betriebszeit t an. Die Ordinate ist im relativen Maßstab mit der zur Zeit t vorhandenen Zahl überlebender Prüflinge. Zu jedem Zeitpunkt erkennt man, wieviel Prozent der ursprünglichen Prüflinge noch in Betrieb sind. Also haben wir damit eine *Lebensdauerverteilung*. Entspricht eine solche Darstellung der einer bekannten Verteilung, so kann man danach weitere Berechnungen anstellen. Wir sehen in Bild 1, daß die Wahrscheinlichkeit des Überlebens zum Zeitpunkt $t = 2$ dann 65% beträgt. Auf einen *Einzel*prüfling bezogen, kann man allerdings nicht sagen, daß er gerade zu diesem Zeitpunkt ausfällt. Es steht demnach also fest, daß die ermit-

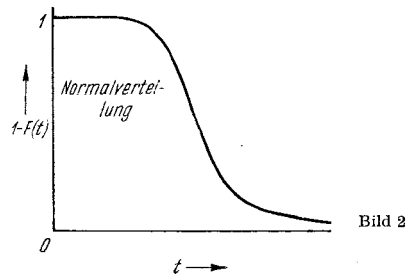


Bild 2

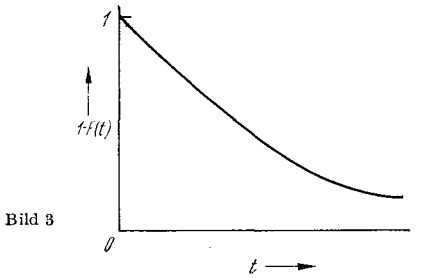


Bild 3

telten *statistischen* Angaben nicht mit *absoluten* Angaben, wie beispielsweise 20 Ω, zu vergleichen sind. An anderer Stelle kommen wir nochmals darauf zurück. Bild 2 und Bild 3 zeigen einige bekannte Lebensdauerverteilungen, und zwar die *Normalverteilung* sowie die *Exponentialverteilung.*

Wenn wir nun die *Verteilungsfunktion* als φ (t) bezeichnen, so ergibt sich nach den Ausführungen zu Bild 1 φ (t) $= \frac{n_0 - n}{n_0}$.

Der Index 0 bezieht sich auf die Zahl n der Prüflinge zur Zeit t = 0. Die *Wahrscheinlichkeitsdichte* steht in engem Zusammenhang mit der Verteilungsfunktion, denn es gilt allgemein für die Wahrscheinlichkeitsdichte $f(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}$, f (t) wurde nur der Vollständigkeit halber genannt.

2.3. Was ist Betriebszuverlässigkeit?

Ganz allgemein würde wahrscheinlich jeder technisch interessierte Leser auf diese Frage etwa so antworten, daß Betriebszuverlässigkeit als ein umfassender Begriff in der Technik gilt. Wir wollen uns jedoch um eine genauere Definition bemühen. Zuvor daher folgendes: Gerade im Zeitalter der Astronautik ist einzusehen, daß sich die Lösung eines technischen Problems erst dann verwerten läßt, wenn sie in höchstem Grad Zuverlässigkeit gewährleistet. Eine absolute Zuverlässigkeit aber gibt es noch nicht. Wird es sie jemals geben? Man kann solche Erörterungen nur in Verbindung mit

der Wahrscheinlichkeit beantworten; d. h., man muß mit einer bestimmten Sicherheit wissen, welche Zuverlässigkeit bei der Benutzung des Erzeugnisses vorhanden ist, welche Sicherheit bei der Einhaltung bestimmter Bedingungen besteht oder in welcher möglichen Weise Transport- und sonstige Umgebungsverhältnisse wirken können. Beispielsweise hat ein Wert von 0,999 eine große Bedeutung als Angabe, daß das interessierende Ereignis zum gegebenen Zeitpunkt mit der genannten Wahrscheinlichkeit eintritt. Uns werden naturgemäß elektronische Systeme (Anlagen, Geräte, Baugruppen) und Elemente (elektronische Bauelemente sowie in den Systemen vorhandene bzw. an den Systemen wirkende mechanische Einrichtungen) interessieren. Nach dem Vorhergesagten ist danach die Zuverlässigkeit die *Überlebenswahrscheinlichkeit R(t)* von Elementen und Systemen, die ihre Funktion unter geforderten Betriebs- und Umgebungsbedingungen für den betrachteten Zeitabschnitt einhalten. Wir erkennen, daß R(t) für eine andere Zeit auch einen anderen Wert haben muß bzw. daß sie sich bei anderen Verhältnissen ebenfalls ändert. Im Gegensatz zur Zuverlässigkeit existiert natürlich die Unzuverlässigkeit oder *Ausfallwahrscheinlichkeit*, die man mit F(t) bezeichnet. R(t) und F(t) ergänzen sich zu 1. Somit ist

$$R(t) + F(t) = 1 . \tag{3}$$

2.4. Die Ausfallrate

Bei Geräten der Amateurtechnik sind — wie überhaupt in der Elektronik — in den einzelnen Systemen die unterschiedlichsten Bauelemente zu Schaltungen vereinigt. Da aber Amateure ebenso wie die Industrie allgemein eine bestimmte Zuverlässigkeit der Bauelemente voraussetzen oder zumindest annehmen müssen, wollen wir das Ausfallverhalten von *Systemen* betrachten. Die zu einer Schaltung zusammengefügten Bauelemente kann man prinzipiell in 2 Gruppen unterteilen.
Die eine Gruppe vereinigt Bauteile (bzw. wir rechnen solche zu ihr), an denen kaum ein Verschleiß zu bemerken ist (z. B. Kondensatoren, Widerstände). Obgleich *einzelne* Exemplare

„kaum" ausfallen, verursachen sie jedoch bei einer Vielzahl, wie sie etwa in einer großen Rechenanlage anzutreffen sind, schließlich Ausfälle. Leider geschieht das ohne vorherige „Ankündigung", im Gegenteil, ganz plötzlich versagt das System. Derartige spontane Ausfälle sind zufällig.

Zur anderen Gruppe rechnen wir solche Bauelemente, die in Abhängigkeit zur Betriebszeit merklich altern, sich verbrauchen. Man sagt auch, sie ermüden; es handelt sich offensichtlich um *Verschleißerscheinungen*. Die Lebensdauer solcher Bauelemente ist begrenzt, und aus der Praxis weiß man, wann sie völlig versagen. Unter solchen Bauteilen versteht man beispielsweise Motoren (Verbrauch der Kohlen), Zerhacker, Röhren sowie eine große Anzahl mechanischer Einrichtungen. Bekanntlich kommt aber auch bei Röhren ein *plötzlicher* Ausfall vor. Doch ist gegenüber dem Verschleiß die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ausfalls um wenigstens eine Größenordnung geringer. Anders gesagt, in der Zeit der Beanspruchung, wo ein Verschleiß stattfinden könnte, ist das Erzeugnis noch imstande, gewisse Arbeitsbedingungen zu erfüllen, weil eben kein plötzlicher Ausfall zu bemerken ist (z. B. Taschenlampenbatterie). Röhren sind typische Vertreter beider Ausfallmöglichkeiten.

Streng genommen, ist noch eine dritte Gruppe zu nennen, bei der infolge Überlagerung fortschreitenden Verschleißes plötzlicher Ausfall eintritt. Dazu später mehr.

Noch eines sollten wir uns merken: Die Lebensdauer verschleißbehafteter Elemente hat nur im Zusammenhang mit der komplexen Ausfallrate eines Systems Bedeutung. Danach hat man die Wartung, also auch den Ersatz verbrauchter Bauelemente einzurichten. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen läßt sich ein solcher Wartungsvorgang auf ein Minimum reduzieren. Es liegt nahe, durch vorbeugende Wartung den Verschleiß überhaupt zu vermeiden. In diese Richtung müssen unsere Überlegungen gehen, wobei wir uns zuerst mit den plötzlichen Ausfällen beschäftigen wollen. Die Praxis hat gezeigt, daß Ausfälle unvermeidlich sind, solange Menschen ihre Erzeugnisse nicht absolut zuverlässig herstellen können. Mittels der Mathematik sind wir in der Lage, Betrachtungen

anzustellen, die eine berechtigte Vorhersage bzw. Vorausschau, ja eine bewußte Beeinflussung der Zuverlässigkeit ermöglichen. Mit der Berechnung der Ausfallrate ist es möglich, die Zuverlässigkeit in Zahlen auszudrücken. Die Ausfallrate läßt sich wie folgt definieren:

Die *Ausfallrate* $\lambda(t)$ ist als Bezugsgröße zur Zeit zu sehen, sie gibt den Teil von Bauelementen oder Systemen an, die in einer bestimmten Zeiteinheit ausfallen.

Mathematisch ergibt sich die Ausfallrate zu

$$\lambda(t) = \frac{dn}{n} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$$

$$= \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = \frac{f(t)}{W(t)}. \qquad (4)$$

Außer den schon genannten Größen bezeichnen wir mit n die Anzahl der Prüfmuster sowie dn usw. als Differential. Für Näherungsrechnungen können wir statt d auch eine endliche Differenz nehmen. Dann wäre

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n}{n} \cdot \frac{1}{\Delta t}. \qquad (5)$$

In grafischer Darstellung könnte $\lambda(t)$ etwa gemäß Bild 4 verlaufen. Eine derartige Kurve wird allgemein als „Badewannenkurve" angegeben. Dieser Kurvenzug läßt sich mit guter

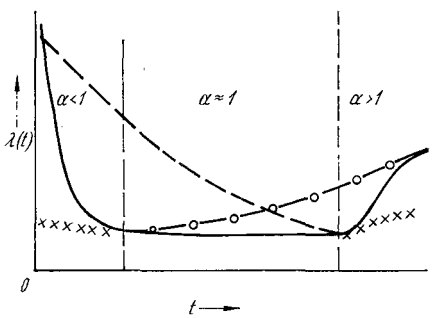


Bild 4

Näherung durch die *Weibull*-Verteilung beschreiben. Danach ist Unzuverlässigkeit oder eben Ausfallwahrscheinlichkeit

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{\alpha}}. \tag{6}$$

Bisweilen wird auch der Exponent $\frac{t^{\alpha}}{T}$ gesetzt. Mit Gl. (6) ergibt sich für

$$\lambda(t) = \frac{\alpha\, t^{\alpha-1}}{T^{\alpha}}. \tag{7}$$

T gilt als Bezugsgröße für einen konstanten Zeitabschnitt. Der Parameter α grenzt die Zeitabschnitte (siehe Bild 4) ein. Ist nämlich $\alpha < 1$, so sinkt die Ausfallrate mit zunehmender Zeit. Für $\alpha = 1$ bleibt λ (t) unabhängig von der Zeit (T — konstante Zeitgröße!).
Schließlich steigt λ (t) mit der Zeit, wenn $\alpha > 1$.
Nun noch einige Bemerkungen zu den sonstigen Kurven von Bild 4. Da ist zunächst der - - - - - Kurvenzug. Er besagt, daß die Ausfallrate während des gesamten Einsatzes eines Systems bis zum Abschnitt $\alpha > 1$ nicht konstant ist bzw. für längere Zeit eine höhere Ausfallrate aufweist. Derartige Eigenschaften von Bauelementen oder Systemen müssen auf jeden Fall ausgeschaltet werden. Der Kurvenzug - o - o - o - bringt ebenfalls zum Ausdruck, daß λ (t) nicht konstant ist: es tritt eine frühzeitige Alterung ein! Der mit xxxxx versehene Kurvenzug läßt erkennen: Hier handelt es sich um ein Erzeugnis von bester Zuverlässigkeit, die Ausfallrate ist praktisch konstant. Da die genannten Zeitabschnitte große Bedeutung haben, seien sie näher betrachtet.

2.4.1. Der Zeitabschnitt mit $\alpha < 1$

Die nach Bild 4 angegebene Kurve ist das Resultat einer Reihe von Versuchsergebnissen (im Idealfall von unendlich vielen Prüflingen). Da nun jedes System eine Anhäufung von Bauelementen darstellt, die gleiche oder ähnliche Ausfalleigenschaften haben, so wäre der Grenzfall, daß ein einziges System eine Ausfallrate aufwiese, wie sie in den verschiedensten Abhängigkeiten in Bild 4 gezeigt ist.

Nehmen wir beispielsweise an, ein Funkamateur habe einen größeren Empfänger gebaut und dieser sei bereit für den langersehnten Betrieb. Eine ähnliche Feststellung könnte für einen anderen Amateur zutreffen. In Abhängigkeit der Betriebsstunden werden sich nun einmal bei dem einen Empfänger nach kurzer Zeit etwa Widerstand R 12, dann eine kalte Lötstelle bemerkbar machen, schließlich wird ohne äußerlich erkennbaren Grund die Sicherung ausfallen. Der andere Empfänger zeigt eine Reihe anderer, kurz hintereinander auftretender Ausfälle oder aber — es treten bei ihm im gleichen Zeitabschnitt keinerlei Ausfälle auf. Ähnliche Beobachtungen sind auch bei industriell hergestellten Geräten möglich. Man kann daher wohl behaupten, daß überall ein unterschiedlicher Parameter α vorliegt. Doch wieso ? Ganz einfach! Hersteller A, B, C usw. (oder Amateur A, B, C) haben für das gleiche Erzeugnis jeweils eine individuelle „Fabrikations"-methode. Das Ergebnis kennzeichnet der Volksmund etwa so: „Die Qualität von A ist besser als die von B."

Wir stellen fest, der Zeitabschnitt bis nahezu $\alpha \approx 1$ offenbart die schwachen Stellen der verwendeten Bauelemente; technologische Mängel, Entwicklungs- und Konstruktionsfehler kommen zum Vorschein. Allgemein erhielt daher der Zeitabschnitt $\alpha < 1$ die Bezeichnung *Abschnitt der Frühausfälle.*

Man muß also daran interessiert sein, Erzeugnisse ohne solche schwachen Stellen zu produzieren. Das bedeutet bisweilen jedoch einen beträchtlichen Prüfaufwand, der nicht nur ökonomisch belastet. Daher besteht nicht immer größte Bereitwilligkeit für eine solche umfassende Prüfung.

Für Amateurgeräte ist der genannte Zeitabschnitt unter einem anderen Gesichtspunkt zu betrachten; anders gesagt, wenn der Amateur sich die Erkenntnisse der Produktion zunutze macht, wird auch er Erfolg haben.

Doch abschließend die berechtigte Frage: Gibt es Serienerzeugnisse, die keine Frühausfälle aufweisen ? Darauf ist nur eine Antwort möglich: Statistischgesehen, nein, denn trotz sorgfältigster Fabrikation sind Frühausfälle niemals restlos auszuschließen. Doch man kann sie auf ein Minimum bringen (Ökonomie).

2.4.2. Der Zeitabschnitt mit $\alpha \approx 1$

In Verbindung mit Gl. (7) erhalten wir für $\lambda(t) = \frac{1}{T}$ Da T eine Zeiteinheit darstellt, ist $\lambda(t)$ nicht variabel, sondern hat einen festen Wert. Das erkennen wir auch am Diagramm, da der Kurvenzug mit $\alpha \approx 1$ parallel der Abszisse verläuft. $\frac{1}{T}$ besagt also, daß in den Zeitabständen T im Mittel ein Ausfall zu verzeichnen ist.

Machen wir uns die Situation an einer großen Anzahl von Prüflingen klar. Diese werden alle den gleichen Prüfbedingungen ausgesetzt, wobei Muster 91 nach der Zeit $t = \frac{1}{2}T$, Muster 550 nach der Zeit $t = 3\,T$ ausfällt usw. Wir erkennen, die Ausfälle erfolgen nicht in regelmäßigen Abständen. Das heißt, die Ursachen, die zu Ausfällen führen, sind ganz unterschiedlicher Art. Trotzdem kann man bestimmte statistische Gesetzmäßigkeiten dabei zugrunde legen. Soviel erkennen wir aber aus den Ausfallzeiten, daß die mittlere Zeit der Ausfallabstände etwa T ist. Man bezeichnet den Zeitabschnitt, in dem $\alpha \approx 1$ ist, als Abschnitt der *normalen Betriebszeit*, und zwar deshalb, weil $\lambda(t)$ offensichtlich über die normale Betriebszeit hinaus ein Minimum haben kann.

Also sind konkrete Zahlenangaben über die Ausfallrate besonders wertvoll. Wie erhalten wir diese? Nach Definition der Ausfallrate wäre man bei Kenntnis der Ausfälle je Zeiteinheit schon wesentlich weiter auf dem Wege zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen. Und da der Gerätehersteller heute bestimmte Forderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit zu erfüllen hat, muß er seine Forderungen an den Bauelementeproduzenten weitergeben. Ähnliches läßt sich auch in die Amateurpraxis übertragen. Soviel muß man aber verlangen können, daß die einzelnen Bauelemente eine Mindestausfallrate nicht überschreiten, wie sollte sonst beispielsweise die Wettbewerbsfähigkeit bei Geräten geringerer Zuverlässigkeit

möglich sein! Wir hatten mit $\alpha = 1$ für $\lambda\,(t) = \text{konstant} = \frac{1}{T}$ gefunden. Dieser Wert gilt natürlich gemäß Definition der Ausfallrate nur unter den dort angegebenen Bedingungen. Der Reziprokwert $\frac{1}{T}$ wird in der Literatur unterschiedlich bezeichnet. In der deutschsprachigen Literatur hat man sehr oft $\frac{1}{T} = \lambda$ gesetzt. Damit erhält die konstante Ausfallrate die Bezeichnung λ-Faktor. Der Zahlenwert, den sie angibt, ist Zeiteinheit $^{-1}$, z. B. $10^{-6}\text{h}^{-1} = 10^{-6}$ Ausfälle je Stunde. Eine Bezeichnung je Jahr wäre auch möglich!

Der λ-Faktor unterscheidet sich nach Bauelementetyp. Man kann an einer solchen Zahlenangabe abschätzen, wie hoch die Zuverlässigkeit des einen Bauelements gegenüber dem anderen ist. Damit ergibt sich also bereits eine Auswahl. Der Leser wird vielleicht vorschnell sagen „Was kann ich denn mit dieser Angabe 10^{-6}h^{-1} anfangen?". Stellen wir uns vor, es seien 10^3 Bauteile gleichen Typs unter gleichen Bedingungen zu einem System vereint, dann beträgt die Ausfallrate nicht mehr 10^{-6}h^{-1}, sondern $10^3 \cdot 10^{-6}\text{h}^{-1} = 10^{-3}\text{h}^{-1}$. Es ist also jetzt zu erwarten, daß ein Bauelement im Mittel jeweils in 10^3 h ausfallen wird. Das steigert sich natürlich entsprechend, wenn wir 10^6 Bauelemente hätten. Man müßte dann in jeder Stunde mit einem Ausfall rechnen.

Was läßt sich weiterhin aus der Angabe der Ausfallrate erkennen? Einmal wird durch die Vereinigung einer Vielzahl von Bauelementen in einem System klar, wie wichtig es ist, wenn die Ausfallrate einen möglichst geringen Wert hat. Zum anderen läßt sich erkennen, daß man nicht vorher weiß, *welches* Bauelement gerade jetzt ausfallen muß, d. h., die Streuung um den Mittelwert ist sehr groß!

Doch kann man sich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit den entsprechenden Überblick verschaffen, und zwar um so besser, je mehr Prüfmuster zur Ermittlung von λ herangezogen wurden oder je länger die Prüfzeit war. Abgesehen von Prüfzeit und Prüfmusterumfang sind derartige Prüfanforderun-

gen nur mittels mathematisch-statistischer Methoden sowie in kollektiver Zusammenarbeit einer Reihe von Institutionen zu bewältigen. Verschiedentlich versucht man bereits mit sogenannten Zeitraffermethoden in kürzester Zeit zu einem Ergebnis zu kommen. Logischerweise muß dann der *Zeitraffungsfaktor* bekannt sein, denn durch erhöhte Belastungen dürfen sich ja die Einsatzbedingungen des Prüflings (physikalisch) nicht verändern. Leider sind wir hinsichtlich der Angaben zu den λ-Faktoren noch nicht am Ende. Jedem ist bekannt, daß ein Bauelement unter verschiedensten elektrischen Bedingungen betrieben wird. Hinzu kommen eine Temperaturbelastung innerhalb und außerhalb des Systems, extreme Einsatzbedingungen (bei militärischen Geräten u. a.). Alle diese Faktoren wirken sich auf den Wert der Ausfallrate aus. Für den Gerätehersteller wäre es wichtig, über Abhängigkeit von λ-Faktoren unter den genannten Bedingungen genaue Angaben zu besitzen. Für die Ausfallrate im wirklichen Einsatz ergibt sich danach folgende Abhängigkeit:

$$\lambda = \lambda_N \cdot f_1(\vartheta) \cdot f_2(P) \cdot f_3(U) \ldots f_n(X) ; \qquad (8)$$

hierin ist beispielsweise die Abhängigkeit des λ-Faktors von Temperatur, von Leistung, von Spannung sowie von sonstigen Einflüssen angedeutet.

Es folgt eine Zusammenstellung von λ-Faktoren für eine Reihe von Bauelementen. Nennwerte von λ-Faktoren in $10^{-6}h^{-1}$

Wickelteile	
Netztransformator, allgemein	$2 \cdot 10^{-1}$
Hochspannungstransformator, klein	2
Netzdrossel	$2 \cdot 10^{-1}$
Spule, durch die Gleichstrom fließt	10^{-1}
Spule ohne fließenden Gleichstrom	$5 \cdot 10^{-2}$
Relais	1
Drehmelder	2
Motor mit Kollektor	15
Kurzschlußläufer	2
Drehspulinstrument	1
Steck- und Schaltverbindungen	
Schalter ohne Relaiskontakt	$5 \cdot 10^{-1}$
Kontakt am Geräteeinschub	10^{-1}
Lötstelle	$3 \cdot 10^{-2}$

Röhren	
Weitverkehrsröhre	10^{-1}
Langlebensdauerröhre	1
Röhre normaler Fertigung	10
Subminaturröhre	50
Leistungsröhre	30
Bildröhre	10
Sperröhre	20
Klystron	10
Magnetron	20
Thyratron mittlerer Leistung	50
Stabilisator	25
Fotozelle	10
Halbleiter	
Ge-Diode	$4 \cdot 10^{-2}$
Ge-Transistor	$4 \cdot 10^{-1}$
Si-Diode	10^{-2}
Si-Transistor	10^{-1}
Selengleichrichter	2
Widerstände	
Schichtwiderstand	$5 \cdot 10^{-1}$
Metallschichtwiderstand	$5 \cdot 10^{-1}$
Varistor, Thermistor	$5 \cdot 10^{-1}$
Filmwiderstand	$3 \cdot 10^{-2}$
Einstellregler	2
Potentiometer	5
Drahtwiderstand	1
Sicherung	$2 \cdot 10^{-1}$
Kondensatoren	
MP-Kondensator (ohne Gleichspannung)	10^{-2}
MP-Kondensator (mit Gleichspannung)	10^{-1}
Keramikkondensator	10^{-1}
Trimmer	11
Glimmerkondensator	$5 \cdot 10^{-1}$
Papierkondensator	$5 \cdot 10^{-1}$
Styroflexkondensator	1
Drehkondensator (Luftkondensator)	10^{-1}
Elektrolytkondensator	2
Tantalkondensator	3
Quarz	10^{-1}

Die Tabelle wird später noch bei Behandlung der Systemzuverlässigkeit vervollständigt.
Als Beispiel für den Gebrauch der Werte der λ-Faktor eines MP-Kondensators: dieser beträgt $10^{-6} \cdot 10^{-2} = 10^{-8}h^{-1}$.

2.4.3. Der Zeitabschnitt mit $\alpha > 1$

Sehen wir nochmals Bild 4 an, so erkennen wir, daß nach dem Abschnitt der normalen Betriebszeit wiederum ein Ansteigen der Ausfallrate zu bemerken ist. Verfolgt man den Kurvenzug (gestrichelt), so sieht man ein Maximum von λ (t). Der Verlauf geht für bestimmte α-Werte bzw. Standardabweichungen in die *Normalverteilung* über. Das bedeutet: Durch Verschleiß oder sonstige Alterserscheinungen sich einstellende Ausfallraten entsprechen in ihrer Lebensdauerverteilung der Normalverteilung.
Wir müssen aber in unserer allgemeinen Betrachtung zur Ausfallrate unterscheiden, ob ein System gealtert ist oder ob nur einzelne kurzlebige Bauelemente im Verlauf der normalen Betriebszeit mehrmals ersetzt werden. Betrachten wir nach Bild 4 die Ausfallrate eines *Systems*, dann bedeutet der Zeitabschnitt $\alpha > 1$, daß nunmehr die allgemeine Alterung des *Systems* eintritt, beziehen wir uns auf *Bauelemente*, dann ist die Alterung der einzelnen Bauelemente gemeint.

Im ersten Fall müßte man zu diesem Zeitpunkt eine generelle Überholung des Systems durchführen oder ein neues anschaffen (was im Zusammenhang mit der sogenannten *moralischen Lebensdauer* zu sehen ist; nach vorliegenden Erfahrungen kann man nämlich mit einer neuen Technik auf dem entsprechenden Gebiet in jeweils 6 bis 8 Jahren rechnen).

Es wurde bereits erläutert, daß die Abhängigkeit von λ (t) sowohl bei Systemen als auch bei Bauelementen gemäß Diagramm Bild 4 läuft, und zwar ist dies vornehmlich bei Systemen der Fall. Das schließt allerdings nicht aus, daß man in einem System auch Bauelemente mit Lebensdauerwerten antrifft, die man in Verbindung mit der Zeit T (sie wurde bei Abschnitt $\alpha = 1$ zum erstenmal genannt) bringen muß. Hat man für ein System die Ausfallrate $\triangleq \lambda_{ges}$, dann läßt sich ihr

reziproker Wert als t_r angeben. Gilt für solche kurzlebigen Bauelemente als Lebensdauer M_ν, so läßt sich das in einigen Merksätzen zusammenfassen:

— Gibt es in einem System Bauelemente, deren M_ν (ν soll auf die verschiedenen Bauelementetypen hinweisen) noch wesentlich unter t_r liegt, so sind diese zu geeigneter Zeit zu ersetzen, d. h., es muß eine Wartung vorgenommen werden. Diese Wartungszeit richtet sich nach dem Bauelement und der geringsten Lebensdauer. Man bedenke, daß auch M eine statistische Zahl ist! Führt man also die Wartung richtig durch, dann wird t_r nicht beeinflußt.

— Hat man Elemente mit $M \approx t_r$, so erhöht sich die Ausfallhäufigkeit, denn zu den Zufallsausfällen kommen ggf. noch Verschleißausfälle hinzu, d. h., es tritt eine Überlagerung beider Ursachen auf. Abhilfe ist nur möglich durch eingehende Wartung.

— Bei der Gegebenheit $M_\nu \gg t_r$ kommt es dann lediglich zu Zufallsausfällen! Damit hat man eine Zuverlässigkeit erreicht, die praktisch nicht überboten werden kann. Die Wartung ist minimal, was ebenfalls ein Kriterium für Zuverlässigkeit und Qualität bedeutet.

— Beim Funkamateur gelten die genannten Kriterien nicht in derartig absoluter Form. Beispielsweise wird er wohl erst dann eine Röhre erneuern, wenn ihm wiederholt beim Rapport schlechte Modulation bestätigt wurde. Doch auch für den Amateur gilt: *Verbrauchte Elemente erhöhen die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls bedeutend.* Daher sollte er die sich relativ rasch verbrauchenden Bauelemente in seinen Geräten in angemessenen Zeitabständen überprüfen.

Ähnliches trifft übrigens auch für den Fernsehempfänger zu.

2.4.4. Überlagerung verschiedener Ausfallursachen

Aus den Merksätzen in Abschnitt 2.4.3. wurde klar, daß die Ausfallrate infolge Verschleißes kurzlebiger Bauelemente eine Vergrößerung erfährt. Bauelemente, die sichtbar ermüden, haben eine Abhängigkeit der Zuverlässigkeit, die entsprechend

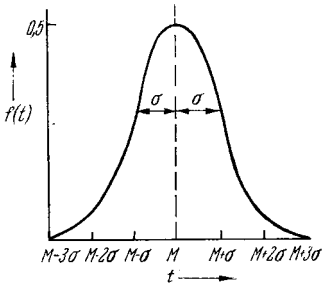


Bild 5

der *Normalverteilung* ist. Nach Bild 5 ergibt sich eine *mittlere Lebensdauer* aus einer Stichprobe von n Elementen von ($n > 25$)

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} t_i \tag{9}$$

mit der sogenannten Standardabweichung

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(t_i - M)^2}{n}}. \tag{10}$$

Darin ist t_i die Zeit, in der das Bauelement ausfällt. Allerdings könnte sich bei einer anderen Stichprobe durchaus ein M usw. mit einer gewissen Abweichung ergeben.

Setzt man in die Beziehung der Ausfallrate die Dichtefunktion f (t) ein, so läßt sich leicht feststellen, daß die Ausfallrate nicht konstant ist. Das konnten wir bereits für $\alpha > 1$ erkennen. Aus Gründen optimaler Zuverlässigkeit darf jedoch die Ausfallrate keine Vergrößerung erfahren, d. h., es muß etwa zum Zeitpunkt $M - 3\sigma$ eine Überprüfung der ermüdeten Bauelemente stattfinden. Besser noch wäre ein Indikator, der den jeweiligen Betriebszustand anzeigt. Man hat also zu überlegen, was ökonomischer ist: eine Wartung, die unabhängig von den Eigenschaften des zu wartenden Elements einen entsprechenden Ersatz vornimmt, oder ein Indikator, der den Betriebszustand anzeigt. Die zweite Version ist besonders dann

empfehlenswert, wenn man weder M noch σ kennt. Beachte: *Der „Indikator" des Amateurs ist der Amateur selbst!*
Noch eins hat Bedeutung: Die Betriebszeit t für ein kurzlebiges Element muß aufsummiert werden.

2.5. Einige Bemerkungen zur mittleren Funktionsdauer

Ausgehend von dem Begriff der *mittleren Lebensdauer* sei in diesem Fall die allgemeine Beziehung genannt

$$t_r = \int_0^\infty R(t); dt = \int_0^\infty [1 - F(t)]\, dt\,. \qquad (11)$$

Setzt man beispielsweise in diese Beziehung Gl. (6) ein, dann hätte man mit $\alpha = 1$ für $t_r = T$.
Noch etwas muß am Rande erwähnt werden: die sogenannten *Integrationsgrenzen*, einmal 0, dann ∞. Eine Summierung der Versuchszeiten bis zum Ausfall bringt erst dann das richtige Ergebnis im statistischen Sinne, wenn man die Versuchszeit bis ins Unendliche verlängert. Für die Belange der Amateurtechnik steht nicht zur Diskussion, inwieweit man zu gewissen Fehlergebnissen gelangt, wenn man die Zeit nicht ins Unendliche ausdehnt. Es sollte nur ausgedrückt werden, daß sich die Angaben über Lebensdauerwerte in der Realität nicht mit einer Zahl der allgemeinen Ingenieurtechnik vergleichen lassen. Integrieren wir R (t) mit der Dichte der Normalverteilung, so erhalten wir mit $t_r = M$ die mittlere Lebensdauer der verschleißbehafteten Bauelemente. Im Fall, daß sich $t_r = T$ ergab, hatten wir dagegen die Lebensdauer von Elementen, die praktisch keinen Verschleiß aufweisen, sondern plötzlich ausfallen.
Bild 6 verdeutlicht nochmals den Vorgang, in welcher Weise Elemente entweder in ihrer oder über ihre Toleranzgrenze hinaus ausfallen können (durch Toleranz oder durch plötzlichen Ausfall).
In Verbindung mit Gl. (11) ließ sich durch Einsetzen von Gl. (6) erkennen, daß für eine konstante Ausfallrate $t_r = \frac{1}{\lambda}$

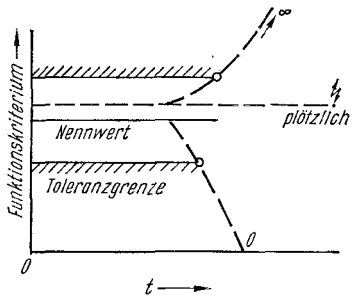


Bild 6

sein muß. Demnach ist der *Reziprokwert der mittleren Lebensdauer* von Elementen, die plötzlich ausfallen, zugleich der *λ-Faktor*.

Den Reziprokwert von λ_{ges} bezeichnet man aber mit mittlerer Funktionsdauer oder *MTBF* (= *meantime between failures*). Der Unterschied zur anderen Bezeichnung besteht darin, daß im Fall des einzelnen Elements dieses absolut unbrauchbar wird, während beim System nach erfolgter Reparatur weiterer Betrieb möglich ist.

Die mittlere Funktionsdauer gilt heute mit als Kriterium für die Qualität. Und es bedarf seitens der Hersteller von Systemen großer Anstrengungen, um t_r nachzuweisen bzw. überhaupt zu erreichen. Die praktische mittlere Funktionsdauer t_p weist vielfach Unterschiede zu t_r auf. Diese kann am Verfahren zur Ermittlung von t_p oder an der Rechenmethode zur Ermittlung von t_r liegen, und zwar auf Grund heute noch unterschiedlicher Auffassungen bei der Ermittlung der theoretischen mittleren Funktionsdauer bzw. infolge unbekannter λ-Faktoren sowie der unterschiedlichen Betriebs- und Umgebungsverhältnisse.

Abschließend sei noch einiges zum Ausdruck mittlere Lebensdauer gesagt. Hinsichtlich der Normalverteilung (bzw. Verschleißes) beträgt die Zuverlässigkeit oder Überlebenswahrscheinlichkeit bis zum Zeitpunkt der mittleren Lebensdauer 50%, bei der *Weibull*-Verteilung mit $\alpha = 1$ dagegen ist die Zuverlässigkeit nur etwa 37%.

3. System und Element im Zusammenhang

Nachdem eine Anzahl immer wiederkehrender Kenngrößen als Einführung in die Zuverlässigkeitsproblematik behandelt sowie einige Gesetze zur Wahrscheinlichkeitsrechnung gestreift wurden, beschäftigen wir uns jetzt direkt mit der Ermittlung der Systemzuverlässigkeit. Man stelle sich beispielsweise eine Richtfunkstrecke mit einer Anzahl von N-Relaisstationen vor. Es läßt sich ohne weiteres einsehen: Was im Bereich der Station N_1 geschieht, ist unabhängig davon, was in N_2 funktionell vorgeht; jede der Stationen aber muß funktionieren, wenn am Ende der Strecke das Signal ankommen soll. Ist die Zuverlässigkeit von N_1 zum Zeitpunkt t gleich $R_1(t)$, die von $N_2 \triangleq R_2(t)$ und schließlich die von $N_n \triangleq R_n(t)$, dann beträgt die Gesamtzuverlässigkeit der Strecke

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \ldots R_n(t). \qquad (12)$$

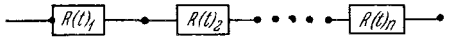
Allgemein ist $R_i(t) < 1$. Demnach muß $R_s(t)$ noch kleiner werden. Damit sind wir mitten in der Zuverlässigkeitsproblematik. Für eine bestimmte Zuverlässigkeit muß entweder $R_i(t)$ größer oder die Anzahl der Stufen geringer werden. Wenn sich aber beides nicht verwirklichen läßt, sind besondere Maßnahmen notwendig, über die noch zu sprechen sein wird.

Man kann aber mit einer bestimmten Vorstellung über den Zuverlässigkeitswert seine Forderungen an die Untergruppenhersteller weitergeben.
Hat man bei den Gruppen gleiche Zuverlässigkeit, dann wird

$$R_s(t) = R_i(t)^n ; \qquad (13)$$

n — Anzahl der Gruppen.

Noch etwas läßt sich aus Gl. (12) sofort ableiten: Funktioniert zur Zeit $t = t_x$ eine der Stationen nicht, ist $R_i(t)$ also 0, so

Bild 7 

wird $R_s(t)$ ebenfalls 0. In der Realität heißt das: Bei Ausfall einer Station der Richtfunkstrecke ist die gesamte Strecke nicht einsatzfähig. In der Zuverlässigkeitstheorie nennt man eine solche Anordnung *Serienschaltung* (Bild 7).

In der Elektronik gibt es zahllose Anordnungen, die eine Serienschaltung im Zuverlässigkeitssinn darstellen. Manchmal wird in der Literatur auch von einer *Kette* gesprochen; und bei Defekt *eines* Gliedes fällt die ganze Kette aus.

Unsere Aufmerksamkeit gilt nun den Anordnungen, die dem Amateur zugänglich sind. Ist beispielsweise ein Sender, ein Empfänger oder ein Netzgerät auch eine Serienschaltung? Selbstverständlich, im allgemeinen müssen wir sie dazu rechnen. Fällt irgendein Element aus, so ist in den meisten Fällen die Funktion des gesamten Geräts unterbunden. Verschiedentlich sind noch Teilfunktionen möglich. Ohne besondere Vorkehrungen muß man die meisten Geräte der Amateurtechnik wie der sonstigen Elektronik als Serienschaltungen im Sinn der Zuverlässigkeit ansehen. Wir können daher $R_i(t) = e^{-t\lambda_i}$ setzen, und zwar, weil

- uns vornehmlich die normale Betriebszeit eines Systems interessiert;
- dann die Ausfallrate ein Minimum aufweist und zeitunabhängig ist ($\alpha = 1$).

In der Praxis müssen wir dann einsetzen

$$R_s(t) = e^{-t\lambda_1} \cdot e^{-t\lambda_2} \dots e^{-t\lambda_n}$$
$$= e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots \lambda_n)} \quad . \tag{14}$$

Es wird deutlich, daß sich die einzelnen Ausfallraten addieren. Also gilt allgemein für Seriensysteme

$$\lambda_{ges} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, . \tag{15}$$

Wir hatten unsere Amateurgeräte ebenfalls als Serienschaltungen erkannt. Deshalb setzen wir in unserem Fall infolge der

verschiedenen Bauelemente der Schaltung für die Ausfallrate

$$\lambda_{ges} = n_1 \lambda_1 + n_2 \lambda_2 + \ldots + n_s \lambda_s = \frac{1}{t_r}; \qquad (16)$$

n_s — Anzahl der Elemente mit gleichen λ-Faktoren.

Außerdem sei nochmals wiederholt, daß der Reziprokwert von λ_{ges} die uns sehr interessierende mittlere Funktionsdauer t_r ist. Mit Diagramm 11 (Anhang) kann man bei einer geforderten Zeit t_r sowie bei bekannten λ-Faktoren sofort die notwendige Anzahl der Elemente ermitteln.
Diagramm 12 stellt die fallende e-Funktion dar, gewissermaßen die Standardfunktion der Zuverlässigkeit. Danach ist hier $R(t) = ex\left(-\frac{t}{t_r}\right) = ex(-pt)$ und $F(t) = 1 - ex\left(-\frac{t}{t_r}\right)$ aufgetragen. Wir erkennen auf der Abszisse das Verhältnis $\frac{t}{t_r}$ und auf den Ordinaten R (t) bzw. F (t). Für $\frac{t}{t_r} = 1$ beträgt beispielsweise die Zuverlässigkeit etwa 37%, hingegen bei $\frac{t}{t_r} = 2$ nur noch 13%. Schließlich wird R (t) für $\frac{t}{t_r} = 0{,}5$ etwa 61%, und mit $\frac{t}{t_r} = 0{,}1$ lesen wir ab R (t) = 90%. Mit guter Näherung kann man bei $\frac{t}{t_r} \leqq 0{,}1$ also schreiben

$$R(t) \approx 1 - \frac{t}{t_r}. \qquad (17)$$

Einige Zahlen der Praxis mögen den Umgang mit t und t_r noch besser verdeutlichen. Nehmen wir an, $t_r = 10^3$ h, und nun stellen wir uns die Frage, wie groß ist die Überlebenswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit) für die Zeit t = 100 h? Mit Gl. (17) ergibt sich $R(t) = 1 - \frac{100}{1000} = 0{,}09 = 90\%$.
Hätten wir dagegen t = 10 h, so wird R (t) 99%.
Was fängt man nun mit diesen Angaben an? Nachstehende Beispiele sollen es zeigen:

a — $R(t) = 90\%$: Von 100 Geräten gleichen Typs überstehen im Mittel 90 Geräte unter gleichen Funktionsbedingungen die Zeit t ohne Ausfall, 10 Geräte jedoch nicht. Man erkennt, daß sich eine derartige Feststellung nicht nur für den Planer auswirkt!

b — Haben wir dagegen 1 Amateurgerät, so lassen sich die obigen Angaben wie folgt deuten. Mi $\frac{t}{t_r} = 0{,}1$ ist $t = t_r [1 - R(t)]$. Die Werte des Beispiels a ergeben mit $t_r = 1000$ h, dann $t = 100$ h.
Man kann somit 10mal einen 100-h-Test durchführen, bevor das Gerät im Mittel 1mal ausfällt. Hätten wir $R(t) = 0{,}999$, so wird bei gleichem t_r also $t = 1$. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, 1000mal einen 1-h-Test zu absolvieren, bevor das Gerät im Mittel 1mal ausfällt.

Dafür, daß ein System mit der Betriebszeit $t = t_r$ übersteht, ist $R(t) = 37\%$ gemäß Diagramm 12, S.84. Diese Feststellung verliert etwas an Bedeutung bei Systemen, z. B. bei einem Empfänger, denn ein solches System braucht man nicht wegzuwerfen, wenn tatsächlich zu dieser Zeit ein Ausfall früher eintritt. Nach erfolgter Reparatur kann es weiter betrieben werden. Allgemein versteht man also unter Systemen reparierbare Einrichtungen; Ausnahmen bilden Kabelverstärker, Satellitensysteme o. ä. Nicht reparierbare Einrichtungen sind vornehmlich Bauelemente.

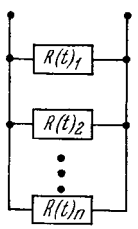


Bild 8

Eine Parallelschaltung von Systemen im Sinn der Zuverlässigkeit ist möglich. Ja, es gibt eine Reihe von Kombinationen, die Serien- und Parallelschaltung vereinen. Die Gesamtzuverlässigkeit einer Parallelschaltung ist

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - R_i(t)] \; ; \qquad (18)$$

siehe dazu auch Bild 8.

Aus Diagr. 14, S. 86, läßt sich $R_p(t)$ sofort ablesen. Zur Vereinfachung nehmen wir an, daß jedes parallelgeschaltete System gleiche Zuverlässigkeit aufweist.

3.1. Zur Praxis der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten

Gl. (14) zeigt, wie wir die Berechnung der Zuverlässigkeit uns interessierender Systeme durchführen können. Da ein System aus einer Vielzahl elektronischer Bauelemente und mechanischer Anordnungen bestehen kann, wird das System ähnlich auf Umgebungsverhältnisse usw. reagieren wie eben diese Bauelemente. Gl. (14) erweitert sich deshalb wie folgt:

$$R(t) = e^{-\lambda_{ges} t \cdot K \cdot \gamma} \qquad (19)$$

Der Faktor K kennzeichnet den Einsatzort des Systems. Es ergibt sich:

Einsatzort	K
Labor	1
allgemeiner stationärer Betrieb	1,5
Betrieb auf Fahrzeugen	2
Betrieb auf Schiffen	3
Luftfahrt	5

Die Geräte des Funkamateurs sind mit etwa 1,5 anzusetzen. Den Faktor γ im Exponenten sollte man als Sicherheitsfaktor deklarieren. Er ist besonders dann erforderlich, wenn bei der Festlegung von Zuverlässigkeitskennwerten ökonomische Kennziffern abgeleitet werden. Uns kommt es weniger darauf an, die mittlere Funktionsdauer auf eine Stunde genau zu ermitteln (was sich durch besondere Rechenmethoden vielleicht ermöglichen ließe), sondern vielmehr, in welcher Weise wir die erhaltenen Werte in der Praxis verwenden können. Einige Tatsachen beleuchten die Notwendigkeit von γ:

— Die λ-Faktoren, mit denen man rechnet, sind allgemein nicht die der eigenen Industrie.

— Infolge der sehr geringen Ausfallrate, die verschiedene wichtige Bauelemente angeblich haben, muß man deren statistische Werte bezweifeln.
— Nach Gl. (8) ergibt sich für λ im Einsatz ein unterschiedlicher Wert. Das resultiert daraus, daß zwar eine Reihe von Abhängigkeiten erfaßt sind, jedoch nicht sämtliche.
— Die Zeit der Frühausfälle darf nicht mehr vorhanden sein.
— Die Kriterien der Wartung für kurzlebige Elemente sind einzuhalten.
— Die Systeme müssen richtig entwickelt und konstruiert sein.
— Will man Vergleiche zu anderen zuverlässigen Systemen anstellen, dann kann man γ mit 1 ansetzen, denn die Bedingungen dürfen als gleich angenommen werden.

Da die obengenannten Bedingungen keineswegs stets vollständig beachtet werden können, wird für viele Fälle die Ermittlung von λ_{ges} nur als Näherungsverfahren möglich sein. Für die Belange des Amateurs sind die Überlegungen jedoch ausreichend.

3.2. Weitere Hinweise zur Ermittlung der Zuverlässigkeit hinsichtlich der Abhängigkeit der Ausfallrate

Es wurde bereits mehrfach darauf hingewiesen, daß die Ausfallrate von Bauelementen und Systemen infolge äußerer Einflüsse Änderungen erfährt. Aus der einschlägigen Fachliteratur sind funktionelle Beziehungen der Ausfallrate einer Reihe von Bauelementen zusammengestellt. Dieser Überblick soll dem Amateur Hinweise bei Dimensionierungsfragen geben.
Nachstehend einige Gleichungen, die verdeutlichen, wie derartige Diagramme entstehen. Isolierstoffe auf Hartpapierbasis ändern z. B. ihre Isolationseigenschaften mit der Temperatur. Man könnte davon eine Identität zur Lebensdauer ableiten, und zwar ergibt sich eine Halbierung der Lebensdauer bei je 10 °C Temperaturzunahme.

$$\frac{LD}{LD_0} = e^{-0{,}07\,(\vartheta - \vartheta_0)}\ ; \tag{20}$$

ϑ — herrschende Temperatur, ϑ_0 — Bezugstemperatur, LD_0 — in diesem Fall gültige Lebensdauer.

Für Papierkondensatoren hat man gefunden

$$L_{Di} = L_N \left(\frac{U_N}{U}\right)^5\ ; \tag{21}$$

U — Betriebsspannung, U_N — Nennspannung, für die der Kondensator ausgelegt ist.

Man erkennt deutlich, daß mit steigender Spannung die Lebensdauer beträchtlich sinkt. Stehen andere Kondensatortypen zur Debatte, so verändert sich der Exponent.
Die folgende Formel läßt nun erkennen, wie sich die Kapazität von Tantalkondensatoren mit der Zeit ändert:

$$\frac{C}{C_N} \approx t^{-0{,}08}\ . \tag{22}$$

Diese empirisch ermittelte Beziehung gilt bei Nennspannung.

Betreibt man Röhren mit erhöhter Heizspannung, dann soll eine Änderung der Ausfallrate wie folgt eintreten:

$$\lambda \approx \lambda_N \left[0{,}4 + 0{,}6 \left(\frac{U_h}{U_{hN}}\right)^{0{,}5}\right]\ . \tag{23}$$

Außerdem tritt ein Beeinflussung infolge zu hoher Anoden- bzw. Schirmgitterspannung auf

$$\lambda \approx \lambda_N \left(\frac{U_{a,g2}}{U_N}\right)^{1{,}75}\ . \tag{24}$$

Eine derartige Erhöhung der Betriebsspannung bewirkt natürlich auch eine Zunahme der Kolbentemperatur. Deshalb wirkt sich dieser Einfluß auch auf den λ-Faktor aus

$$\lambda \approx \lambda_N \left(\frac{\vartheta_{K0}}{\vartheta_{K0N}}\right)^{5{,}5}\ . \tag{25}$$

Schon diese wenigen Beispiele zeigen, welche Prüfarbeit erforderlich ist, um derartige Zusammenhänge mathematisch darzustellen. Und der Gedanke liegt nahe, daß ohne *völlige* Klarheit über die notwendigen Kennwerte gar keine mathematische Bestimmung möglich ist. Doch genügen die Angaben für unsere Amateurzwecke durchaus. Allerdings sei in diesem Zusammenhang noch auf weitere wichtige Fakten hingewiesen. Man erhält

- durch Anwendung von Gl. (17) einen zahlenmäßigen Hinweis, wo auf Grund der Ausfallrate von Gruppe $X_1 \ldots X_n$ bzw. des Elements B_x das Ausfallverhalten mehr beeinflußt wird;
- wiederum mit Gl. (16) den Hinweis, daß bei vorgegebener Zuverlässigkeitsziffer Schaltungsänderungen im technischen Sinne notwendig sind;
- durch Vergleich mit anderen Systemen eine zahlenmäßige Angabe über die unterschiedlichen Grade der Zuverlässigkeit.

Obgleich die Diagramme S. 76 ff. in anschaulicher Weise das Verhalten der verschiedenen λ-Faktoren demonstrieren, sollte man außerdem Lastverhältnisse mittels einiger Näherungen berücksichtigen.
Wir setzen voraus, daß die Spannungs- oder Leistungsbelastungen unterhalb der Nennbedingungen liegen.

Danach ist

$$\lambda \approx a \cdot \lambda_N ; \quad a < 1 ; \tag{26}$$

außerdem $a = \frac{U}{U_N}$ bzw. $\frac{P}{P_N}$.

Umgebungstemperaturen sind wesentlich schwieriger zu berücksichtigen, da bekanntlich je nach Bauelementetyp bei höherer Temperatur sowohl das eine Verhalten als auch die genaue Umkehrung möglich ist. Wir legen deshalb einen Faktor $b = \frac{\vartheta_{um}}{\vartheta_N}$ fest, und zwar mit folgenden Werten:

zwischen + 10 °C und + 30 °C $\triangleq b_1 = 1$
zwischen + 30 °C und + 50 °C $\triangleq b_2 = 1{,}5$
zwischen + 50 °C und + 80 °C $\triangleq b_3 = 2$
zwischen + 80 °C und + 120 °C $\triangleq b_4 = 4$
zwischen + 10 °C und − 10 °C $\triangleq b_5 = 1{,}5$
zwischen − 10 °C und − 30 °C $\triangleq b_6 = 2$
zwischen − 30 °C und − 60 °C $\triangleq b_7 = 4$

Nun können wir den λ-Faktor eines Bauelements infolge Lasttemperatureinflusses mit der Näherung

$$\lambda \approx a \cdot b_x \cdot \lambda_N \tag{27}$$

erfassen. Die Ausfallrate unter Nennbedingungen lesen wir aus der Aufstellung über λ-Faktoren ab (S. 19).

4. Beispiele zur bisherigen Thematik

Beispiel 4.1.

Bei einer Gruppe von 10 Geräten konnte man 2 spontane Ausfälle in einem Zeitintervall von 500 h beobachten. Welche Ausfallrate ergibt sich für diesen Abschnitt?

Lösung
Mit Gl. (5) ergibt sich

$$\lambda\,(t) \approx \frac{2}{10} \cdot \frac{1}{500} = 4 \cdot 10^{-4} h^{-1}\,.$$

Beispiel 4.2.

Was fängt man mit der Angabe $\lambda = 2 \cdot 10^{-6} h^{-1}$ an?

Lösung

Nach den Bemerkungen zur Ausfallrate erkennt man an dem angegebenen Wert, daß diese konstant ist (eine funktionelle Bemerkung zur Zeit t fehlt!). Offensichtlich handelt es sich um eine Ausfallrate unter ganz bestimmten Bedingungen. Multipliziert man den Zahlenwert mit einer Zeit — beispielsweise mit 10^6 h —, so hätte man in dieser Zeit 2 Ausfälle zu erwarten. Eine andere Auslegung wäre folgende: Man hat 10^3 Bauelemente, dann könnte man alle 500 h mit 1 Ausfall rechnen. Wir erkennen, daß sich infolge der Produktbildung zwischen Zeit und Prüfling immer eine Kombination ergibt, die den Wert 1 ermöglicht.

Beispiel 4.3.

Bestimme die mittlere Lebensdauer und Standardabweichung von Bauelementen, die als Stichprobe aus einer größeren Anzahl gezogen wurden. Man konnte Ausfälle (oder ein Außertoleranzkommen) zu den Zeiten 500 h, 1000 h, 2000 h, 300 h, 800 h, 1500 h beobachten. (Es soll mit dieser Aufgabe auf die

Problematik der Ermittlung von statistischen Angaben hingewiesen werden.)

Lösung

Nach den Gl. (9) und Gl. (10) ist

$$M \approx \frac{1}{6}(500 + 1000 + 2000 + 300 + 800 + 1500) = 1015 \text{ h} ;$$

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{1}{6}[(-515)^2 + (-15)^2 + (-975)^2 + (-715)^2 + (-215)^2 + (-515)^2]}$$

$$\sigma \approx 570 \text{ h} .$$

Beispiel 4.4.

Bei einer Anzahl von Bauelementen, die unter gleichen Bedingungen betrieben wurden, fielen nacheinander 5 von 1000 durch plötzlichen Ausfall aus. Da man also eine Verteilung der Ausfälle nach der fallenden e-Funktion voraussetzen kann, ergibt sich welche Zuverlässigkeit für die Gruppe?

Lösung

Mit Gl. (6) wird für $\alpha = 1$ dann $F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_m}\right)$.

Da außerdem noch $\frac{(n_0 - n)}{n_0} = F(t)$ ist,

erhält man

$$\frac{5}{1000} = F(t) = 1 - R(t) .$$

Somit ist $R(t) = 1 - \frac{5}{1000} = 0{,}995$ oder 99,5%.

Beispiel 4.5.

Die Teile einer Anlage haben für eine vorgegebene Zeit jeweils eine Zuverlässigkeit von 0,99, 0,9 und 0,85. Welche Gesamtzuverlässigkeit wird man für die gesamte Anlage erwarten können?

Lösung

Mit Gl. (12) ergibt sich

$$R(t) = 0{,}99 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}85 = 0{,}757 \triangleq 75{,}7\,\%.$$

Beispiel 4.6.

An ein Gerät ist die Forderung gestellt, einen 24-h-Betrieb mit im Mittel 99% Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Welche geringste Ausfallrate wird benötigt, wenn 100 Baueinheiten als Serienschaltung im Zuverlässigkeitssinn in der Anlage vereint sind?

Lösung

Gemäß Gl. (14) ist $R(t) = 0{,}99$. Also $\lambda t = 1 - 0{,}99 = 0{,}01$, weil $t = 24$ h, also $\lambda_{ges} = \left(\frac{1}{24}\right) \cdot 10^2 = 4{,}18 \cdot 10^{-4}$.

Demnach ist die Ausfallrate einer Baueinheit

$$\lambda = 4{,}18 \cdot 10^{-6}\mathrm{h}^{-1}.$$

Beispiel 4.7.

Ermittle die Ausfallrate eines Geräts, das die Zeit der Frühausfälle hinter sich hat; angenommen wird eine Umgebungstemperatur von 50 °C für die *Bauelemente!*

Bauelemente	*Lösung*
500 Lötstellen	15
10 Elektrolytkondensatoren mit 0,8 U_N	24
100 Schichtwiderstände mit 0,5 P_N	37,5
4 Rundfunkröhren mit U_N, P_N	60
5 Einstellregler mit 0,2 P_N	3
1 Sicherung	0,3
20 Kontakte	2
1 Potentiometer mit 0,2 P_N	1,5
1 Netztransformator	0,3
1 Netzdrossel	0,3
1 Selengleichrichter	3

Wie oft kann man einen 4-h-Betrieb durchführen?

Lösung

Nach Tabelle aus S. 19 erhält man in Verbindung mit Gl. (27) folgende Aufstellung der λ-Werte:

15 24 37,5 60 3,0 0,3 2 1,5 0,3 0,3 3,0

Man erhält etwa $\lambda_{ges} \approx 150 \cdot 10^{-6} h^{-1}$.

Demnach ist $t_r = 6660$ h. Für die Zuverlässigkeit des 4-h-Betriebs ergibt sich $R(t) = 1 - \frac{4}{6660} \approx 0{,}9994$ oder 99,94%. Wir können in Verbindung mit t_r etwa $\frac{6660}{4} = 1666$mal den 4-h-Betrieb mit 99,94% Zuverlässigkeit durchführen, bevor im Mittel 1 Ausfall eintritt. Aus der Aufstellung der λ-Werte erkennt man, daß zuerst bei den Röhren, dann bei den Widerständen, bei den Elektrolytkondensatoren und schließlich bei 1 Lötstelle 1 Ausfall auftreten kann. Des weiteren sei nochmals daran erinnert: Je länger die Betriebszeit im Verhältnis zu t_r ist, um so geringer wird die Wahrscheinlichkeit des Überlebens für diese Zeit!

Beispiel 4.8.

Um das Rechnen hinsichtlich der Ermittlung von t_r möglichst rationell zu gestalten, kann man bei Informationsbetrachtungen mit weiteren Vereinfachungen operieren. So ist es nicht abwegig, immer wiederkehrende Stufen als 1 Bauelement aufzufassen. Bestimmt man bei einer solchen Stufe die Ausfallrate, dann braucht man diesen Wert nur mit der Anzahl gleichartiger Stufen zu multiplizieren.
Spezielle Bauelemente, wie Einstellregler, Potentiometer, Bild- oder Spezialröhren, Relais, Schalter mit den entsprechenden Kontakten usw., sind getrennt zu addieren.

Lösung

Nimmt man den Lastfaktor mit 0,7, den Temperaturfaktor mit 1,5 an, so ergeben sich für

1 NF-Endstufe mit Rundfunkröhre	$50 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 NF-Endstufe mit Ge-Transistor	$7 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 NF-Vorstufe mit Röhre	$18 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 NF-Vorstufe mit Ge-Transistor	$6{,}9 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 HF-Verstärker oder Oszillator mit Röhre	$19{,}5 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 HF-Verstärker mit Ge-Transistor	$5{,}4 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 Multivibrator mit Röhre	$20 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 Multivibrator mit Ge-Transistor	$6{,}4 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 Netzteil mit Doppelweggleichrichter (Röhre)	$18 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 Netzteil mit Doppelweggleichrichter (Selengleichrichter)	$10 \cdot 10^{-6} h^{-1}$
1 Netzteil mit Doppelweggleichrichter (Germaniumgleichrichter)	$5{,}5 \cdot 10^{-6} h^{-1}$

Dazu noch einige weitere Beispiele:

Beispiel 4.8.1.

Fernsehempfänger mit Röhren (Verbundröhren gelten als getrennte Stufe)

10 HF-Stufen	195
1 Netzteil	10
3 NF-Stufen	48
4 NF-Endstufen	200
1 Multivibrator	20
5 Einstellregler	10
2 Potentiometer	10
2 Hochspannungsdioden (Rö)	20
2 Bildröhren	10
diverse Kontakte und Lötstellen	25
	$548 \cdot 10^{-6} h^{-1}$

Es ist $t_r = 1800$ h. Bei einem angenommenen täglichen Betrieb von 3 h könnte man ihn 600mal oder nahezu 2 Jahre durchführen. Da der Verschleiß der Röhren in der gleichen Größenordnung liegt wie t_r, kann es möglich sein, daß einige Röhren bereits vor Beendigung der aufsummierten Betriebszeit bis t_r ersetzt werden müssen.

Beispiel 4.8.2.

Kurzwellenempfänger mit Röhren

9 HF-Stufen	180
1 NF-Stufe	18
1 NF-Endstufe	50
1 Netzteil	15
2 Potentiometer	10
diverse Kontakte und weitere Lötstellen	20
	$293 \cdot 10^{-6}\text{h}^{-1}$ oder $t_r = 3600$ h.

Bei 2 h täglichen Betriebs ergeben sich etwa 5 Jahre, bevor im Mittel 1 plötzlicher Ausfall zu verzeichnen ist.

Beispiel 4.8.3.

2-m-Sender mit Anoden-Schirmgitter-Modulation

3 HF-Stufen	60
2 Endstufen	100
2 NF-Endstufen	100
1 Phasenumkehrstufe	20
1 NF-Vorstufe	20
2 Potentiometer	10
diverse Kontakte und weitere Lötstellen	10
	$320 \cdot 10^{-6}\text{h}^{-1}$ oder $t_r = 3100$ h.

Da Sender und Empfänger für jeden Sendeamateur zum „Fahren" eines QSO erforderlich sind, erhöht sich die Gesamtausfallrate für beide Einheiten zu $5{,}98 \cdot 10^{-4}\ \text{h}^{-1}$.

5. Hinweise zur Redundanz

Aus Gl. (16) war ersichtlich, daß sich die Gesamtausfallrate bei einer Serienschaltung durch Addition der Teilausfallraten ergibt. Infolge erhöhter Forderungen an die Zuverlässigkeitsparameter, besteht zuweilen keine Möglichkeit mehr, die gestellten Forderungen bei einer Serienschaltung zu erfüllen. Angenommen, es komme darauf an, einen 24-h-Betrieb über längere Zeit zu gewährleisten.
Die folgenden Bemerkungen sollen einen Überblick geben, in welcher Weise man eine erhöhte Zuverlässigkeit erreichen kann.

5.1. Was ist Redundanz, wann ist sie notwendig?

Zunächst sei der Begriff *Redundanz* erläutert. Redundanz bezeichnet eine *Vielfältigkeit* oder *Überbestimmung*, d. h. im elektronischen Sinn den Einsatz überzähliger, für die elektrische oder mechanische Funktion nicht erforderliche Bauelemente bzw. Systeme. Durch die Redundanz wird also beabsichtigt, infolge der mitlaufenden Einheiten einen Ausfall zu verhindern oder wesentlich zu erschweren.

Es gibt 2 Arten von Redundanz. In der Literatur ist die Bezeichnung dafür unterschiedlich. Wir wählen *heiße Reserve* für die Anordnung, bei der das Element oder die überzähligen Einheiten sofort funktionell mitbetrieben werden. Im Fall der *kalten Reserve* wird die überzählige Einheit erst dann hinzugeschaltet, wenn die eigentliche Einheit versagt. Es gibt noch eine Abweichung dieser beiden Arten, deren Beschreibung hier zu weit führen würde.
Redundanz ist dann erforderlich bzw. berechtigt, wenn

— durch sie ein zuverlässigerer Betrieb möglich ist, den man hinsichtlich der Anforderungen an das System aus ökonomischen, menschlichen oder anderen Gründen erreichen muß;

— sich trotz eines Minimums an Bauelementen und anderen Zuverlässigkeitseinflüssen die geforderte Zuverlässigkeit nicht erreichen läßt;
— selbst mit den zuverlässigsten Bauelementen eine ausreichende mittlere Funktionsdauer nicht gewährleistet ist.

Welche Art der Redundanz Anwendung finden soll, hängt ab

— von der Art und der Auswirkung des Bauelementeausfalls;
— von der höchstzulässigen Änderung der Bauelementeparameter (Toleranz);
— von der Möglichkeit, Fehler zu erkennen, zu lokalisieren und zu reparieren.

5.2. Redundante Anordnungen

Aus Gl. (18) ließ sich die Abhängigkeit der Zuverlässigkeit innerhalb einer Parallelschaltung erkennen. Die Anordnung in Bild 9 zeigt Abwandlungen von Parallelschaltungen im Zuverlässigkeitssinn. Daraus geht hervor, daß eine Parallelschaltung als redundante Schaltung zu werten ist.
Noch etwas ist an dieser Stelle zu sagen:
Bei Ausfall der vorletzten redundanten Einheit muß noch der volle elektronische Betrieb möglich sein. Aus dem Bild ist ersichtlich, daß die oberste Anordnung eine Kette mit r-Gruppen bildet, in denen m-Baueinheiten mit k-Elementen zusammengeschaltet sind. Das darunterstehende Bild hat demnach 2 Gruppen ($r = 2$). Jede Gruppe wird gebildet aus $m = 2$ Einheiten, jede Einheit aus $1, 2, .. k$ Elementen. Schließlich besteht die nächste Anordnung nur aus einer Gruppe ($r = 1$), aber aus 3 Einheiten ($m = 3$), wobei jede Einheit $k = 5$ Bauelemente hat.

5.2.1. Heiße Reserve

Die Zuverlässigkeit der Anordnungen nach Bild 9 beträgt

$$R(t)_{r,m,k} = \left(1 - \left(1 - \left(1 - F(t)\right)^k\right)^m\right)^r. \qquad (28)$$

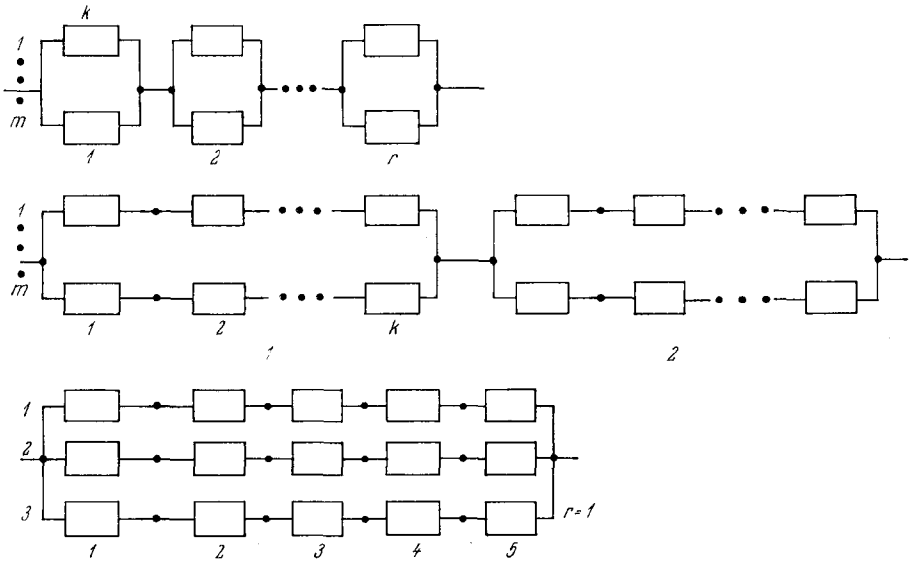


Bild 9

Unter der Voraussetzung von plötzlichen Ausfällen gilt mit $F(t) = 1 - \mathrm{ex}\left(-\frac{t}{t_0}\right)$, wobei t_0 die mittlere Lebensdauer der Einzelanordnung ist (Anordnung kann 1 Bauelement oder 1 System sein). Setzt man F (t) in Gl. (28) ein, so wird

$$R(t)_{r,m,k} = \left(1 \left(-1 - \mathrm{ex}\left(-\frac{kt}{t_0}\right)\right)^m\right)^r. \tag{29}$$

Weil sehr oft $\frac{kt}{t_0} < 0{,}1$, kann man in Näherung schreiben

$$R(t)_{r,m,k} \approx \mathrm{ex}\left(-r\left(-\frac{kt}{t_0}\right)^m\right). \tag{30}$$

Beispielsweise ist die Zuverlässigkeit für 2 im Zuverlässigkeitssinn parallelgeschaltete Anordnungen

$$R(t)_{2,1} = 2\,\mathrm{ex}\left(-\frac{t}{t_0}\right) - \mathrm{ex}\left(-\frac{2t}{t_0}\right). \tag{31}$$

Die mittlere Zeit zwischen den Ausfällen einer Gruppe (r = 1) beträgt

$$t_{rR} = \frac{t_0}{k}\sum_{\mu=1}^{m} = -\frac{1}{\mu}. \tag{32}$$

Nach Diagr. 16, S. 88, kann man t_{rR}a blesen. Wir erkennen, für m = 1 (ohne Reserve) ist $t_{rR} = t_r = \frac{t_0}{k}$, hingegen ergibt sich für m = 2

$$t_{rR} = \frac{t_0}{k}\left(1 + \frac{1}{2}\right) = 1{,}5\,\frac{t_0}{k}.$$

5.2.2. Kalte Reserve

In diesem Fall ist die Zuverlässigkeit

$$R(t)_{r,m,k} \approx \mathrm{ex}\left(-(rj)\frac{m}{m!}\right); \tag{33}$$

$j = \frac{kt}{t_0}$, m! = m-Fakultät.

Wir nennen die Zeit bis zum 1. Ausfall der Anlage für $m = 2$ und $m = 3$

$$m = 2\ T_{1k} \approx \frac{t_0}{kr}\left(0{,}667 + \sqrt{r}\right), \tag{34}$$

$$m = 3\ T_{1k} \approx \frac{t_0}{kr}\left(0{,}525 + 1{,}623\left(\sqrt[3]{r}\right)^2 + 0{,}745\sqrt[3]{r}\right). \tag{35}$$

In diesen Formeln wurde die Zuverlässigkeit der Umschalt- und Überwachungseinrichtung nicht berücksichtigt. Die Zeit bis zum 1. Ausfall beträgt unter Berücksichtigung einer Umschalteinrichtung

$$T_{1,2,k} = \frac{t_0}{k}\left[1 + \left(\frac{1}{1+\tau}\right)^2\right];$$

$\tau = \frac{s}{k}$, s — Zahl der Elemente der Zusatzeinrichtung.

Man erkennt, wenn $s \ll k$ (was praktisch immer der Fall sein wird), so ergibt $T_{1,2,k} = 2\frac{t_0}{k}$, d. h. die doppelte Funktionsdauer eines Einzelsystems!

Für die Belange des Funkamateurs kommt weniger die kalte Reserve in Frage. Es sei denn, der Amateur selbst ist die „Überwachungseinrichtung" und schaltet bei dem Defekt die Reserve ein. Es kommt bei ihm vielmehr die sogenannte *Bauelementeredundanz* zur Anwendung (also die heiße Reserve).
In Auswertung von Gl. (29) bzw. des Diagr. 15, S. 87, erkennt man, daß mit $r = 1$ und $m > 1$ die Zuverlässigkeit in der Umgebung $t \approx 0$ höher ist als für ein nichtredundantes System bzw. Bauelement. Demnach ergeben sich höhere Zuverlässigkeitswerte, wenn man wiederholt kurze Betriebszeiten wählt. Da aber die Ausfallrate nicht konstant ist, nimmt die Zuverlässigkeit mit jedem neuen Betriebszeitabschnitt ab. Man muß deshalb jeweils genau abwägen, inwieweit der Aufwand zum ökonomischen Nutzen steht. Allerdings gibt es für eine Anzahl von Diensten nur die Forderung der höchsten Betriebszuverlässigkeit zum Schutz des Menschen!

Für die Ausfallrate ergibt sich dabei mit $r = 1$, $k = 1$ und $m > 1$

$$\lambda\,(t)_p = m\,\lambda \frac{[1 - ex\,(-\lambda t)]^{m-1}\,ex\,(-\lambda t)}{1 - [1 - ex\,(-\lambda t)]^m}. \qquad (36)$$

In dieser Beziehung ist λ die Ausfallrate des Einzelelements oder Systems. Wir erkennen, daß sich für $m = 1$ wieder $\lambda\,(t)_p = \lambda$ ergibt, also eine Konstanz. Für den Fall, daß $\lambda t < 0{,}1$ (was sehr oft möglich ist), ergibt sich mit guter Näherung

$$\lambda\,(t)_p \approx m\lambda\,(1 - \lambda t)\,(\lambda t)^{m-1}.$$

Diagr. 17, S. 89, zeigt die Auswertung dieser Formel; 2 Werte von λt mögen die Zeitabhängigkeit von $\lambda\,(t)_p$ erkennen lassen. Wenn $\lambda t = 10^{-3}$, dann ist $\lambda\,(t)_p \approx$ 500mal kleiner als $\lambda\,(m = 2)$, aber nur 5mal geringer, wenn $\lambda t = 0{,}1$.

5.3. Bauelementeredundanz

Vorausgesetzt wird, daß nur heiße Reserve zur Anwendung gelangt. Zunächst wollen wir uns mit der Frage beschäftigen, ob echte Redundanz beim elektronischen Bauelement möglich ist, bzw. ob durch redundante Bauelemente bei Ausfall des m-1-Elements unverminderter Betrieb des Systems garantiert bleibt.

Man könnte nun einfach sagen: Unverminderter Betrieb des Systems hängt von der Schaltung ab. Es erscheint z. B. durchaus möglich, daß bei Schaltvorgängen eine Widerstandsänderung um den doppelten Betrag nicht offenbar wird; doch ist die Veränderung des Lastwiderstands bei einer Transistorstufe stets von einer beträchtlichen Abweichung der Ausgangsparameter begleitet. Man denke weiterhin an die Veränderung des Schirmgitterwiderstands einer Senderendstufe auf den doppelten Wert; dann waren also vor dem Ausfall des einen 2 Widerstände parallelgeschaltet. Es läßt sich sofort erkennen, daß ohne die Parallelschaltung der Widerstände die Funktion der Endstufe unterbrochen wäre.

Es muß daher von vornherein feststehen, in welchem Maß bei redundanten Bauelementen durch welchen Ausfall von Bauelementepartnern welche Toleranzüberschreitung bei welchen den Anwender interessierenden Parametern möglich ist. Zu klären wäre außerdem, ob unterdimensionierte Bauelemente als einfachste Form der Redundanz gelten können. Dazu ist zu sagen: nein. Begründet wird diese Verneinung wie folgt: Bei den Angaben der Ausfallratenwerte handelt es sich um statistische Mittelwerte. Es kommt also durchaus vor, daß das eine Element infolge der Mittelwertbildung eine wesentlich geringere Lebensdauer aufweist als das andere. Natürlich kann die Lebensdauer eines solchen Elements in der Realität zwar länger sein als der Mittelwert, aber es wird doch wesentlich früher ausfallen als ein anderes Bauelement mit dem gleichen oder mit einem höheren Mittelwert. Sind die Elemente aber redundant ausgeführt, so besteht auch während des Vorhandenseins funktionierender Elemente für jedes einzelne eine Unterdimensionierung. Es könnte selbstverständlich alles das eintreten, was bereits zum unterdimensionierten Einzelelement gesagt wurde, doch wenn nun tatsächlich 1 Partner ausfällt, so sind noch immer m-1 Partner vorhanden.

Nachfolgend noch einige Feststellungen zu dieser Problematik:

— *Widerstände* schaltet man parallel, weil sie fast nur infolge Unterbrechung ausfallen. Es besteht also Identität zur Zuverlässigkeitsparallelschaltung. Die Widerstände sind so zu dimensionieren, daß bei Ausfall des m-1-Widerstands die übrigbleibenden Partner nicht überlastet werden. Wieviel Widerstände parallelzuschalten sind, hängt von der Toleranzabweichung des interessierenden Parameters ab. Aus Diagr. 18, S. 90, läßt sich die Belastung der redundanten Widerstände bis $m = 3$ sofort ablesen (Näheres siehe dort).

— *Kondensatoren* schaltet man prinzipiell in Reihe, weil sie vornehmlich durch Plattenschluß ausfallen. Es gibt aber Kondensatortypen, die auch ausfallen, weil der Anschluß zur Platte durch Oxydation unterbrochen ist (z. B. Elektrolytkondensatoren). Gemäß Bild 10 wurden beide Möglich-

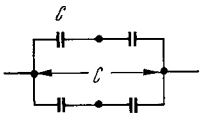


Bild 10

keiten des Ausfalls berücksichtigt. Fällt z. B. ein Kondensator durch Plattenschluß aus, so ist der andere Kondensator noch in Reihe geschaltet und verhindert einen völligen Ausfall. Tritt dagegen an einer Platte eine Unterbrechung auf, dann wirken noch die beiden anderen in Reihe geschalteten Kondensatoren. Hat jede Teilkapazität den Wert C, dann ist die Gesamtkapazität ebenfalls C. Ergibt sich bei einem Kondensator ein Kurzschluß, so hat man 1,5 C, bei Unterbrechung 0,5 C. Es liegt damit im Zuverlässigkeitssinn $m = 2$ und $k = 2$ vor. Die Dimensionierung eines jeden Kondensators hat so zu erfolgen, daß bei den geschilderten Ausfallmöglichkeiten keinerlei Gefährdung für den übriggebliebenen Kondensator besteht. Außerdem ist ohne weiteres ersichtlich, daß bei frequenzbestimmenden Gliedern (Oszillatoren) vermutlich keine redundanten Anordnungen vorgenommen werden können. Dagegen dürften sie z. B. im Netzteil ausgezeichnete Dienste leisten.

— *Dioden* bzw. *Gleichrichter* schaltet man wie Kondensatoren. Es kommt bei ihnen allerdings noch die Bedingung des maximalen Stromes hinzu.

— Alle *Kontakte* schaltet man parallel, sofern damit keine HF-mäßigen Gesichtspunkte verletzt werden.

— *Röhren* und *Transistoren* kann man nur über entsprechende Netzwerke redundant anordnen. Allerdings ist in dieser Hinsicht noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten.

6. Verfügbarkeit

Bei der Anwendung von Geräten und Anlagen würde es zu nicht vertretbaren Stillstandszeiten kommen, wenn Wartung, Reparatur, Wegezeit sowie andere Einflüsse unzulässig hohe Werte annähmen. Wie bereits gesagt, gibt es Dienste, die eine 100%ige Verfügbarkeit verlangen. Deshalb ist der Zuverlässigkeitsparameter t_p bzw. t_r kein ausreichendes Kriterium für den Gebrauch einer Anlage. Man muß bei der Konzeption einer Anlage weiterhin berücksichtigen,

- in welchem Umfang sie gewartet werden muß und kann;
- wie hoch die mittlere Funktionsdauer ist;
- ob stets ein Wartungs- oder Reparaturingenieur bereit sein muß;
- ob die Ausfallursache schnellstens erkannt und beseitigt werden kann;
- ob für den ausgefallenen Bauteil sofort Ersatz zur Verfügung steht;
- in welchem Maß Wege- oder andere Zeiten vom Augenblick der Meldung des Ausfalls an bis zur vollständigen Beseitigung einzuplanen sind.

Die aufgeführten Punkte zeigen, wie berechtigt es ist, eine Beurteilung der Zuverlässigkeit nicht nur nach t_p vorzunehmen. Für die *Verfügbarkeit* ergibt sich

$$V_K = \frac{1}{1 + \frac{t_{rep}}{t_r}}; \tag{37}$$

t_{rep} — gesamte Reparaturzeit, die sich zusammensetzt aus

$$t_{rep} = t_{man} + t_{ser}; \tag{38}$$

t_{man} — die Zeit, die für Reparatur *ohne* Wartung benötigt wird,

t_{ser} — die zusätzliche Zeit des Service, in die beispielsweise die Wegezeit mit eingeht.

Hat man ein kleines Verhältnis $\frac{t_{rep}}{t_r}$, so wird Gl. (37)

$$V_k \approx 1 - \frac{t_{rep}}{t_r}. \tag{39}$$

Eine etwas andere Auslegung von V_k summiert die einzelnen Betriebszeitabschnitte (wie Reparaturzeitabschnitte), so daß gilt

$$V_k = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma t_{rep}}{\Sigma t_p}}. \tag{40}$$

An dieser Beziehung läßt sich rückblickend erkennen, wie groß die Verfügbarkeit in einem verflossenen Zeitabschnitt war. Diagr. 19, S. 91, zeigt V_k als Funktion von $\frac{t_{rep}}{t_r}$. Man sieht, daß nur geringe Werte von $\frac{t_{rep}}{t_r}$ eine ausreichende Verfügbarkeit ermöglichen. Setzt man nun $\frac{t_{man}}{t_{ser}} = g$, dann ergibt sich in Verbindung mit Gl. (37) und Gl. (38)

$$g = \frac{1}{\frac{t_r}{t_{man}}\left(\frac{1 - V_k}{V_k}\right) - 1}. \tag{41}$$

Aus Diagramm 20 läßt sich g sofort ablesen. Ein $V_k = 0{,}99$ und $\frac{t_r}{t_{man}} = 10^3$ bedingen $g = 0{,}11$, d. h., $t_{ser} = 9\, t_{man}$.
Also ergibt sich für eine eigentliche Reparaturzeit von 1 h eine zusätzliche Zeit von 9 h. Wäre dagegen das Verhältnis $\frac{t_r}{t_{man}} = 10^2$, so müßte man keine zusätzliche Zeit t_{ser} vorsehen, da $g \to \infty$ geht.
Aus dem Geschilderten wird deutlich, wie wichtig es ist, neben der mittleren Funktionsdauer die gesamte Reparaturzeit mit zu betrachten. Das muß bei der Konzipierung von

Systemen genügend berücksichtigt werden. Deshalb ist t_r gemäß Diagramm 21 als Funktion von t_{rep} bei verschiedenem V_k angegeben. Wir können somit nach den angegebenen Beziehungen

— die Verfügbarkeit von Systemen beim Anwender;

— die Entwicklung einer Anlage in Verbindung mit der mittleren Funktionsdauer sowie mit den erforderlichen Wartungs- bzw. Reparaturzeiten durchführen;

— abschätzen, in welchem Maße eine Wartung vom Service oder direkt vom Anwender erforderlich ist;

— den Umfang des Service ermitteln.

7. Zusammenstellung von Ausfallursachen

An dieser Stelle sei zunächst eine Gegenüberstellung der Definition des Ausfalls vom Gesichtspunkt des Gutachters oder des Anwenders gegeben.

Der kritische Beurteiler definiert den Ausfall als dann vorhanden, wenn die Parameter des Kennblatts bzw. des Pflichtenhefts außerhalb der Toleranz liegen.

Der Ausfall, wie ihn der *Anwender* von Geräten oder Anlagen definieren könnte, läge dann vor, wenn der Service benachrichtigt werden müßte, um den Fehler zu beheben.

Da man oft einen Anwender hat, der mit der Technik des Geräts nicht vertraut ist, kann durchaus eine Fehlmeldung entstehen. Es liegt nur dann wirklich ein Ausfall vor, wenn eine kostenpflichtige Reparatur notwendig anfiel (Garantie mit eingeschlossen). Auf den ersten Blick scheint die letzte Definition „ungefährlicher" zu sein, weil sehr oft ein Anwender erst sehr spät einen Toleranzausfall im Sinn der Überschreitung von industriellen Pflichtenheftswerten erkennen kann. Dafür wird er aber Beanstandungen haben, die im eigentlichen Sinn des Ausfalls nicht anerkannt werden können. Jedoch sind beispielsweise bei der Konzipierung eines Systems die Eigenschaften des Anwenders gebührend zu berücksichtigen.

Doch nun zu den eigentlichen Ausfallursachen, wobei einschränkend zu sagen ist, daß nur *allgemeine* Ursachen erörtert werden können.

7.1. Ursachen, die zu einem Toleranzausfall führen

Es lassen sich nicht exakt Toleranzausfallursache und plötzliche Ausfallursache auseinanderhalten. Man kann jedoch einschätzen, daß nachstehend aufgeführte Möglichkeiten vorwiegend einen Toleranzausfall hervorrufen.

Dieser tritt ein

— durch natürlichen Verschleiß, weil die bestehende Technik unter Einhaltung ökonomischer Bedingungen keine andere Lösung zuläßt. Dazu rechnen wir z.B. elektronische Röhren aller Art. Vor allem interessiert dabei die wesentliche Toleranzüberschreitung eines wichtigen Parameters wie die Steilheit. Des weiteren nennen wir Trockenbatterien, Glühlampen, Kohlen von Motoren, häufig betätigte Kontaktschleifbahnen;
— infolge falscher Dimensionierung des elektronischen Bauelements, das je nach seiner physikalischen Eigenschaft außer Funktion gehen kann. In diesem Fall ist die Schaltung ein Teil der Ausfallursache. Des weiteren wirken die Umgebungsverhältnisse mit (Mikroklima — Geräteinneres — Makroklima, Luftfeuchtigkeit, Strahlung, mechanische Vibration, Stoß- und ungewöhnliche Einsatzbedingungen). Nicht zu vergessen die Bedienungsperson! Man denke beispielsweise an eine nicht ausreichende Wartung (Gerät völlig verstaubt oder verschmutzt; es bilden sich Kriechstrecken u. ä.);
— durch völligen Verschleiß mechanischer Einrichtungen.

Allerdings müssen wir wissen bzw. darauf hinweisen, wann und in welchem Maß eine mechanische Anordnung zu merkbarem Ausfall führt. Vielfach scheint der eigentliche Benutzer des Geräts eine Toleranzüberschreitung des betreffenden Teiles wahrscheinlich erst dann zu bemerken, wenn die Toleranzgrenze (wie sie der Hersteller für das Bauelement festgelegt hat) schon länger überschritten ist.

Das läßt sich damit erklären, daß sehr oft bestimmte Teileinrichtungen die Funktion des Geräts nicht unmittelbar beeinträchtigen. Ferner kann man eine echte Materialoptimierung sehr oft nicht durchführen, d. h., die dadurch vorhandenen Sicherheiten wirken sich „vorteilhaft" bei der Toleranzüberschreitung aus. Gewiß, man kann auch in diesem Fall nicht verallgemeinern, aber die Tendenz geht in Richtung des geschilderten Beispiels. Auf diesem Gebiet ist noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten.

7.2. Ursachen, die zu plötzlichen Ausfällen führen

Die in Abschnitt 7.1. beschriebenen Möglichkeiten, die zu einem Ausfall führen, lassen sich zum Teil auch jetzt nennen. Bedenken wir jedoch, daß Elemente mit einer begrenzten Lebensdauer während dieses Zeitabschnitts zuverlässig arbeiten, so wird klar, daß der plötzliche Ausfall kaum vorkommt.

Die Ursachen von plötzlichen Ausfällen bei Elementen und Systemen sind

- Herstellungsfehler (ferner Streuung des statistischen Mittelwerts);
- plötzliche Überlastungen elektrischer wie mechanischer Art (z. B. unsachgemäße Bedienung einer Anlage);
- Überlagerungen verschiedener Einwirkungen, wie sie sich mathematisch mit Gl. (8) ausdrücken lassen (siehe auch Diagramme);
- die gleichen subjektiven Einflüsse, wie in Abschnitt 7.1. aufgeführt;
- die große Anzahl von Bauelementen in einem System oder in einer Serienschaltung. (Diese Ausfallursache läßt sich vermindern, indem man Bauelemente mit geringerer Ausfallrate verwendet oder entsprechende Redundanz einplant.

Schließlich sollten wir nicht vergessen, daß wir mit Größen operieren, die zum Teil noch nicht bis ins letzte nachgewiesen wurden.

7.3. Lagerung

Zur *Belastung* der Systeme gehört außer den Transportbedingungen und dem eigentlichen Betrieb die Lagerung. Ja, man kann sagen, daß eine Lagerung verschiedentlich sogar als verschärfte Beanspruchung angesehen werden muß. Gemäß den entsprechenden Gleichungen der Ausfallrate wird sich also auch die Lagerung auf die Ausfallrate auswirken. Es gibt eine Reihe von Bauelementen, bei denen die Ausfallrate infolge der

nicht vorhandenen elektrischen Last sehr gering ist, während sich bei anderen ähnliche Werte ergeben wie unter Betriebsbedingungen.

Schließlich seien noch die sich selbst verbrauchenden Elemente erwähnt. Diese kommen je nach Lagerzeit außer Toleranz. Und obgleich die Ausfallrate hinsichtlich der Zufallsausfälle zeitunabhängig war (d. h. sich eine Lagerung der Systeme nicht in dieser Richtung auswirken dürfte), wird sich die Ausfallrate auf Grund der geschilderten Möglichkeiten mehr oder weniger ändern. Um der großen Streuung des Ausfallratenwerts bezüglich spontaner Ausfälle nach unterschiedlicher Lagerzeit begegnen zu können, muß man in angemessenen Zeitabständen die Geräte oder Anlagenteile entsprechenden Betriebszeiten aussetzen. Hierbei sind die Ausgangsparameter nach ihrer Toleranz mit zu überprüfen. Nur auf diese Weise werden die Bemühungen um zuverlässige Anlagen und Geräte Erfolg haben.

8. Maßnahmen zur Entwicklung und Konstruktion zuverlässiger Geräte

Halten wir uns an die Hinweise aus den vorangegangenen Kapiteln, so sind wir in der Lage, bei einer Neuentwicklung die für ein zuverlässiges Erzeugnis erforderlichen Voraussetzungen zu beachten. Doch es gibt in der Praxis des Entwicklungsingenieurs oder Konstrukteurs noch ausreichend Spielraum in der Konzeption eines zuverlässigen Systems. Die folgenden Hinweise sollen den Weg dazu markieren.

8.1. Gesichtspunkte im Entwicklungsablauf

- Existieren keine Vorbilder für das zu entwickelnde System, dann ist zunächst vorrangig die technische Seite zu betrachten.
- Gibt es Vorbilder, so muß man durch Gegenüberstellung der verschiedenen Ausfallraten eine höhere Zuverlässigkeit für das zu entwickelnde System konzipieren.
- Es sind möglichst keine kurzlebigen Elemente zu verwenden; denn sie erhöhen die Unzuverlässigkeit und den Wartungsaufwand. Sie gefährden außerdem die Verfügbarkeit und können ggf. als Kriterium des zukünftigen Absatzes herangezogen werden. Da auch der jeweilige Stand der Technik bei dieser Betrachtungsweise eine Rolle spielt, ist der Benutzer des Endprodukts auf diese kurzlebigen Bauelemente hinzuweisen. Die Auswechselbarkeit solcher Elemente muß durch entsprechende Zugänglichkeit gesichert sein.
- Man beachte weiterhin die Wettbewerbsfähigkeit des Systems unter dem Gesichtspunkt des Anschaffungspreises, den man durch ein Minimum an Elementen, an Wartung usw. beeinflussen kann. Die eventuell erforderliche Redundanz ist deshalb sorgsam abzuwägen.

— Wodurch läßt sich eine vorgegebene Verfügbarkeit garantieren? Kann man sie durch die mittlere Funktionsdauer erreichen, oder muß der Anwender entsprechenden Wartungsaufwand betreiben? Die Faktoren K und γ sind sinngemäß Gl. (16) zu berücksichtigen.

— Es sind Tests unter den unterschiedlichsten Bedingungen durchzuführen, d. h., möglichst sämtliche Einsatzbedingungen sollten simuliert werden. Durch Dauertest lassen sich Schwachstellen ermitteln bzw. erkennt man die praktische mittlere Funktionsdauer t_p.

— Es ist zu klären, ob durch den Betrieb des entwickelten Geräts andere Dienste gestört werden. Die geforderten Störfeldstärken sowie der Funkstörgrad sind unbedingt einzuhalten.

8.1.1. Schaltung und Zuverlässigkeit

— Nach Lösung des technischen Problems läßt sich auf Grund der ermittelten Ausfallrate feststellen, wo man infolge des höchsten Anteils der Teilausfallrate durch Änderung der Schaltung eine Verminderung erreichen kann.

— Es sind möglichst langerprobte Schaltungen zu verwenden. Vor allem ist *die* Konzeption einer anderen vorzuziehen, in der Bauelemente mit großer Toleranz Verwendung finden können. Ein weiterer Gradmesser für Schaltungsvarianten sollte immer die niedrigere Ausfallrate sein.

  Die Dimensionierung hat möglichst so zu erfolgen, daß die Nennwerte der Elemente unterschritten werden.

— Toleranzbetrachtungen muß man zumindest für statische Betriebswerte durchführen, denn dabei lassen sich sehr gute Exemplarstreuungen, wie Einflüsse durch Temperaturänderungen u. a., gut erkennen.

— Das konzipierte System sollte man aus Gründen der Zuverlässigkeit unter solchen Grenzbedingungen betreiben, die noch eine Sicherheit gegenüber den im Pflichtenheft nachzuweisenden Bedingungen haben.

— Zur Erleichterung der Fehlersuche sind charakteristische Meßpunkte anzubringen, die es gestatten, einen Fehler in kürzester Zeit einzukreisen.

8.2. Maßnahmen bei der Konstruktion

Zur besseren Übersicht ist dieser Abschnitt unterteilt nach dem Aufbau der Gruppen und nach dem Äußeren des Geräts.

8.2.1. Zum Aufbau der Baugruppen

Obgleich infolge der entwickelten Schaltung schon in guter Näherung die Richtung für ein zu konstruierendes Bauteil, Gerät bzw. eine Anlage vorgegeben ist, bleibt noch ein weites Betätigungsfeld für den Konstrukteur (beispielsweise im Hinblick auf eine Serienfertigung u. ä.). Doch wollen wir hier weiterhin unsere Überlegungen auf Zuverlässigkeitsprobleme beschränken.

— Der konstruktive Aufbau eines Geräts ist der entsprechenden Technik gemäß zu gestalten (z. B. richtige Anordnung von Spulen in der UHF-Technik).

— Die sachgemäße Ableitung der in der Schaltung auftretenden Verlustwärme ist zu beachten, und zwar durch direkte Leitung, durch Strömung und durch Abstrahlung.

— Zu bedenken ist, wie sich durch Veränderung der umgebenden Atmosphäre Kriechstrecken, Isolation usw. in Überschläge oder verlustbehaftete Anordnungen verwandeln können. Genormte Luftstrecken sind einzuhalten.

— Man sollte bevorzugt die Leiterplattentechnik anwenden. Durch das mechanische Baukastenprinzip wird der Service sehr gefördert. Um keine Zuverlässigkeitseinbuße zu haben, sind die Kontakte der Anschlüsse zu den Leiterplatten redundant auszuführen. Optimale Zuverlässigkeit sowie Übersichtlichkeit der Schaltung und entsprechende Ökonomie erreicht man in der Kombination des Baukastenprinzips mit mehreren Baugruppen auf *einer* Leiterplatte. Sowohl vertikale als auch horizontale Aufbauweise der Leiter-

platten ist möglich; das hängt von der Temperaturverteilung und vom Einsatz des Geräts ab.

— Der Aufbau ist so zu gestalten, daß sich schadhafte Teile leicht auswechseln lassen. Natürlich gilt dies vornehmlich für Anordnungen, die eine begrenzte Lebensdauer haben.

— Wenn möglich, versuche man die Gießharztechnik anzuwenden.

— Man sollte unbedingt Toleranzuntersuchungen durchführen, und zwar besonders an speziell konstruierten Elementen. Dabei sind Berechnungen zur Feststellung der Lebensdauer zweckmäßig, damit wesentliche Überdimensionierungen vermieden werden. Durch einen Dauertest kann man sich von der Richtigkeit der angestellten Überlegungen überzeugen.

8.2.2. Das Äußere

Vom Äußeren eines Geräts hängt nicht nur sein Verkaufserfolg ab bei industriellen Produkten, sondern es beeinflußt oftmals auch die Zuverlässigkeit des Geräts (auch des Amateurgeräts) im Hinblick auf den Benutzer. Bei kommerziellen Entwicklungen hat heute der Formgestalter ein entscheidendes Wort beim äußeren Aufbau mitzureden. Doch soll uns hier das Äußere nur im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit interessieren.

— Das Äußere wird oft schon durch den speziellen Einsatz beeinflußt, d. h., Schutzgrad und Klimaschutzart sind einzuhalten.

— Obgleich sich das Äußere infolge unterschiedlicher Auffassungen oftmals wandeln wird, veranlassen geschmackvolle Bedienungselemente u. ä. den Benutzer, sorgsam mit dem Gerät umzugehen.

— Bedienungselemente und Überwachungseinrichtungen sind so anzuordnen, daß sie den Eigenschaften des Benutzers entsprechen.

— Transportable Geräte erfordern ein möglichst minimales Gewicht.

— Fehlbedienung sollte nach Möglichkeit niemals einen Ausfall, bestimmt aber keinen Folgeausfall verursachen.

9. Betriebszuverlässigkeit unter militärischen Gesichtspunkten

Der vorige Abschnitt ließ erkennen, welche Maßnahmen in den entsprechenden Bereichen erforderlich sind, damit in der Anwendung der Systeme eine ausreichende Zuverlässigkeit gewährleistet ist. Doch in noch höherem Maße als in der Industrie muß man die Bedeutung der Zuverlässigkeit im Zusammenhang mit der Militärtechnik sehen. Man bedenke, daß das Versagen eines elektronischen Geräts auf militärischem Gebiet unabsehbare Folgen haben kann!

Unter dem Gesichtspunkt einer erreichbaren noch höheren Zuverlässigkeit seien darum einige spezielle Forderungen genannt:

- Es ist bei der Aufgabenstellung festzulegen, ob man ein neues Verfahren entwickeln muß (bei dieser Frage stehen zunächst allerdings nicht nur Zuverlässigkeitsprobleme zur Debatte).
- Die technische Lösung kann sich nur dann durchsetzen, wenn sich die erforderliche Zuverlässigkeit realisieren läßt.
- Je komplizierter ein System aufgebaut werden muß, desto unzuverlässiger *kann* es werden. Aus diesem Grund sollte man vermeiden, Geräte für Mehrzweckaufgaben vorzusehen.
- Man muß abschätzen, welcher Aufwand bei einem unter allen Umständen einzuhaltenden Zuverlässigkeitsgrad erforderlich ist. Die Faktoren Verfügbarkeit und Redundanz sind dabei mit einzubeziehen.
- Die praktische mittlere Funktionsdauer ist je nach Umfang des Systems nachzuweisen. An Geräten, die aus der Fertigung kommen, muß die Zeit der Frühausfälle festgestellt werden. Hierbei gilt mit Näherung, daß die Prüfzeit etwa 0,1 t_p sein kann (t_p zwischen 100 h und 1500 h).
- In jedem der Zeitabschnitte, da in der Entwicklung Konzeption, Brettaufbau, Funktions- und Nullserienmuster

entstehen, ist eine Zuverlässigkeitsberechnung durchzuführen.

— Des weiteren muß man die Eigenschaften des Bedienenden der Geräte unbedingt berücksichtigen. Hinzu kommen die Umweltbedingungen, unter denen er die Anlage oder das Gerät zu bedienen hat. Die Bedienungselemente sind entsprechend zu vereinfachen.
Man hat dabei weiterhin die Reaktionsgeschwindigkeit (Schreck, Angst, Zeitnot), die Überanstrengung, das Versagen der physischen Kräfte u. a. zu berücksichtigen. Dazu gehören außerdem die Grenzen, die dem Gehör, dem Tastsinn und dem Gesicht des Menschen gesetzt sind. Bedienungsfehler dürfen nach Möglichkeit zu keinem Ausfall führen. Ein Folgeausfall ist aber unbedingt zu verhindern.

— Verpackungs- bzw. Transportprobleme sollte man ebenfalls mit genügender Gründlichkeit behandeln. Entsprechende Tests sind notwendig. Man bedenke, daß durch unsachgemäßen Transport außerordentlicher Schaden entstehen kann (u. a. Behindern militärischer Operationen). Auftretende Verpackungs- und Transportschwierigkeiten (z. B. Einsatz in unterschiedlichen Klimazonen) muß man einkalkulieren, damit man ihnen in geeigneter Weise begegnen kann.

— Der Einsatz von Bauelementen ist noch kritischer zu werten. Deshalb nochmals eine Zusammenfassung möglicher Belastungen: Kälte, Wärme, Luftfeuchtigkeit, Kondenswasser, Korrosion, Salzwasser, Schimmelbefall, Staub, Flugsand, Strahlung.

— Die Dokumentation muß im Zusammenhang mit der Verfügbarkeit gesehen werden. Falls der Anwender die Wartung direkt durchführen soll, sind entsprechende Vorschriften anzugeben. Dazu gehört unter anderem eine Reparaturanweisung sowie eine Angabe von Meßpunkten mit Pegelwerten und Impulsbildern. Es ist darauf aufmerksam zu machen, daß kurzlebige Bauelemente (falls sie in der Größenordnung von t_p liegen) rechtzeitig gewartet werden müssen, da diese Bauelemente das Ausfall-

verhalten der gesamten Anlage entscheidend beeinflussen können. Man muß abwägen, ob Indikatoren, die den Betriebszustand der kurzlebigen Bauelemente überwachen, wirtschaftlicher sind als eine Erneuerung der Elemente (gleich, inwieweit sie noch brauchbar sind). Ebenso ist eine automatische Fehleranzeige in Betracht zu ziehen.

— Anwendung kalter oder heißer Reserve hat man gemäß Abschnitt 5.1. optimal vorzusehen.

— Beide Abschnitte (8. und 9.) gestatten also, Maßnahmen einzuleiten, die eine geforderte Zuverlässigkeit gewährleisten.

Schließlich ist jedoch sowohl bei wirtschaftlichen als auch militärischen Erwägungen zu bedenken, daß es keinen Zweck hat, bei einer bestehenden Entwicklung immer wieder neue Forderungen zu erheben; denn die zum Zeitpunkt der Entwicklung existierende Technik kann sich in 6 bis 8 Jahren entscheidend verändern. Daraus ergibt sich der Zeitabschnitt der *moralischen Lebensdauer* von elektronischen Systemen.

10. Zuverlässigkeit und Amateurtechnik

An verschiedenen Stellen dieser Broschüre wurden im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit die Belange des Amateurs erwähnt. Obwohl sich die Vertreter der verschiedensten Berufe mit den geschilderten Problemen vertraut machen sollten, ist dieser Abschnitt speziell dem Funkamateur gewidmet. Dieser oder jener mag sich fragen, ob es nicht übertrieben sei, wenn man den Amateur mit den hier aufgeworfenen Themen „belästigt". (Noch dazu, da sich augenblicklich sogar kommerzielle Stellen z. T. noch nicht in ausreichendem Maß über die Notwendigkeit der Zuverlässigkeit im klaren sind.) Und zwar wollen wir zunächst von dem Amateur sprechen, der im wahrsten Sinn des Wortes als solcher gilt, d. h. der, bei dem es sich nur um die Feierabendbeschäftigung, um sein Hobby, handelt, ohne Beziehung zu seiner beruflichen Tätigkeit. Für diesen gilt: Wie erreiche ich einen bestimmten Effekt? Aber auch ihm liegt der Gedanke nicht fern — falls er etwas zum „Spielen" gebracht hat —, daß das Ding hoffentlich morgen noch geht. Wir sehen, das ist die erste ungewollte Berührung mit der Zuverlässigkeit.

Hat dieser Amateur bereits eine höhere Qualifikation, dann möchte er immer bessere, vollkommenere Geräte bauen. Geräte, die jederzeit einsatzbereit sind.

Doch der größte Teil der heutzutage tätigen Amateure ist bereits durch seine berufliche Tätigkeit mit der Amateurtechnik verbunden; sie sind „vorbelastet". Man kann auch sagen: Was sie im Berufsleben nicht durchführen können, versuchen sie in der Amateurtechnik zu realisieren. Andererseits erhalten sie Impulse, die sie sehr gut im Berufsleben verwerten können. In der Tat, durch eine solche Verquickung von Beruf und Hobby läßt sich der höchste Wirkungsgrad im Berufsleben erreichen. Doch dabei ist unbedingt erforderlich, daß die Belange der Zuverlässigkeit beachtet werden. Deshalb seien die Amateur-Zuverlässigkeitsprobleme zumindest auf prak-

tischem Gebiet betrachtet und an dieser Stelle nochmals zusammenfassend einige Beispiele durchgerechnet. Zur Einführung dazu einige Merksätze.

10.1. Zuverlässigkeit in der Praxis des Amateurs

— Bist du Anfänger, so beginne wirklich mit einfachsten Schaltungen!

— Bringe durch Diskussion mit erfahrenen Kameraden in Erfahrung, welche Schwierigkeiten die von dir beabsichtigte Schaltung bei der Verwirklichung mit sich bringen kann!

— Vergiß die Hinweise deiner Kameraden nicht, denn sie beherrschen bereits das, was du dir gerade erst aneignen willst!

— Überlege dir den Aufbau deines Geräts gründlich!

— Gewöhne dir vom ersten Tag deiner Tätigkeit als Amateur Exaktheit an! (Wie oft ist es schon vorgekommen, daß ein Gerät nicht funktioniert, nur weil es an einer Lötstelle einen Wackelkontakt gab.) Exaktheit ist niemals verlorene Zeit!

— Betreibe deine Bauelemente nach Möglichkeit unterhalb der Nennlast! Es ergeben sich keine Vorteile bei Überschreitung der Nennbedingungen, wie wir wissen, aber Nachteile.

— Beachte die Wärmeverteilung in deinem Gerät! Es kann dadurch zu Überlastungen der Bauelemente kommen. Vielfach werden durch Abstrahlung andere Bauelemente in Mitleidenschaft gezogen.

— Bedenke bei transportablen Geräten, daß sie von *Menschen* getragen werden müssen!

— Ordne die Bedienungselemente so an, daß eine einfache, logische Bedienung möglich ist!

— Bedenke, durch deine aktive Tätigkeit können bei nicht sachgemäßer Arbeit fremde Dienste oder Nachbarn ge-

stört werden! Die entsprechenden Verordnungen (Amateurfunkgesetz) sind unbedingt einzuhalten.

— Beachte die für die jeweilige Technik, mit der du dich gerade beschäftigst, bestehenden Grundsatzprobleme!

10.2. Beispiele zur Ermittlung der Ausfallrate

Mit den in Kapitel 4. angegebenen Beispielen kann man die Ausfallrate bzw. ihren reziproken Wert, die mittlere Funktionsdauer, ermitteln. Nachfolgend in dieser Richtung noch einige auf die Amateurpraxis bezogene Beispiele.

Beispiel 10.2.1.

Bild 11 zeigt eine Gegentaktendstufe mit Germaniumtransistoren.

Berechne die Ausfallrate einer solchen Stufe, wenn bekannt ist, daß die Schichtwiderstände mit 40% P_{Ne}, die Kondensatoren mit 80% P_{cmax} belastet sind. Eine maximale Umgebungstemperatur der Bauelemente von 45 °C ist möglich. Transportabler Betrieb soll vorgesehen werden.

Lösung

Wir schreiben die Ausfallraten nach Art und Anzahl der Bauelemente untereinander:

7 Widerstände	$\triangleq 7 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 0{,}4$	$= 1{,}4 \cdot 10^{-6}$
4 Elektrolytkondensatoren	$\triangleq 4 \cdot 2 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 0{,}8$	$= 6{,}4 \cdot 10^{-6}$
2 Transistoren	$\triangleq 2 \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 0{,}8$	$= 0{,}64 \cdot 10^{-6}$
1 Transformator	$\triangleq 0{,}2 \cdot 10^{-6}h^{-1}$	$= 0{,}2 \cdot 10^{-6}$
25 Lötstellen	$\triangleq 25 \cdot 0{,}03 \cdot 10^{-6}h^{-1}$	$= 0{,}75 \cdot 10^{-6}$
		$9{,}39 \cdot 10^{-6}$

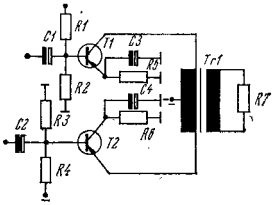


Bild 11

Infolge der maximal auftretenden Umgebungstemperatur ist das Ergebnis mit 1,5 zu multiplizieren, und wegen der Transportverhältnisse müssen wir nochmals mit 2 multiplizieren. Deshalb erhalten wir schließlich $\lambda_{ges} = 28{,}2 \cdot 10^{-6}h^{-1}$.
Den Sicherheitsfaktor brauchen wir bei dieser Betrachtung nicht mit einzubeziehen.

Beispiel 10.2.2.

Wir fragen nach der Wahrscheinlichkeit des ausfallfreien Betriebs hinsichtlich plötzlicher Ausfälle für 2 h, wenn eine Schaltung gemäß Bild 12 vorliegt. Zur Aufgabenstellung ist weiter bekannt: Die Schichtwiderstände werden mit 80 % P_{Ne}, die Keramikkondensatoren mit 10 % U_{Ne} betrieben. An den Drehkondensatoren liegt mit der HF-Amplitude U_{Ne} an. In der Umgebung der Endstufe herrschen 60 °C. Die äußere Temperatur übersteigt nicht 30 %.
In Rö1 und Rö2 verbleiben 0,7 P_V; Rö3 ist mit P_V belastet.

Lösung

Wir stellen auch dieses Mal eine Tabelle mit den verschiedenen Ausfallraten zusammen:

7 Widerstände mit	$7 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 0{,}8$	$= 2{,}8 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
1 Widerstand mit 60 °C	$0{,}5 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 0{,}8 \cdot 2$	$= 0{,}8 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
8 Keramikkondensatoren	$8 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 0{,}1$	$= 0{,}08 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
2 Keramikkondensatoren 60 °C	$2 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 0{,}2 \cdot 2$	$= 0{,}08 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
2 Drehkondensatoren	$2 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 2$	$= 0{,}4 \cdot 10^{-6}h^{-1}$

2 HF-Drosseln	$2 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 2$	$=$	$0{,}4 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
2 Spulen	$2 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 2$	$=$	$0{,}2 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
1 Spule mit 60 °C	$1 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 2$	$=$	$0{,}2 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
2 Potentiometer	$2 \cdot 2 \cdot 10^{-6}h^{-1}$	$=$	$4 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
1 Quarz	$0{,}1 \cdot 10^{-6}h^{-1}$	$=$	$0{,}1 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
1 Instrument 60 °C	$1 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 2$	$=$	$2 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
2 Röhren	$2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 0{,}7$	$=$	$14 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
1 Leistungsröhre 60 °C	$30 \cdot 10^{-6}h^{-1} \cdot 2$	$=$	$60 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
15 Kontakte an Röhrensockeln	$15 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}h^{-1}$	$=$	$1{,}5 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
100 Lötstellen	$100 \cdot 0{,}03 \cdot 10^{-6}h^{-1}$	$=$	$3 \cdot 10^{-6}h^{-1}$
			$89{,}66 \cdot 10^{-6}h^{-1}$

Damit ergibt sich die Zuverlässigkeit zu

$$R(t) \approx 1 - \frac{2}{11\,000} = 0{,}9999 .$$

Das bedeutet praktisch 100%igen Betrieb.

Da wir $t_m = 11\,000$ h haben, könnten wir im Mittel 5 500mal einen 2-h-Test durchführen, bevor ein plötzlicher Ausfall vorkäme. Vorausgesetzt, Entwicklung und Produktion waren richtig, die angenommenen Ausfallraten der Bauelemente müssen in etwa stimmen.

Wir dürfen bei unserer Betrachtung auch nicht vergessen, daß Röhren bezüglich Alterung nur eine mittlere Lebensdauer von etwa 2 000 h haben; demnach müssen diese öfters ausgewechselt werden. Doch, wie oben angedeutet, bei einem 2-h-Betrieb könnte man etwa 15 Jahre ohne einen Ausfall arbeiten. Bei Transistorbestückung ergäbe sich eine noch wesentlich höhere mittlere Funktionsdauer. Außerdem ent-

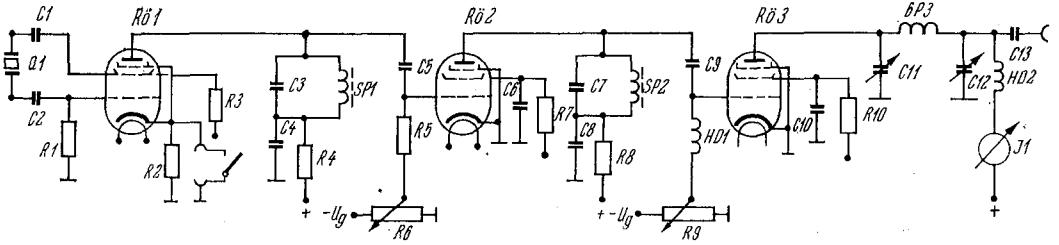

C1
Rö1
Q1
C2
R1
R2
R3
C3
C4
SP1
R4
+ -Ug
C5
R5
R6
Rö2
C6
R7
C7
C8
SP2
R8
+ -Ug
R9
C9
HD1
Rö3
C10
R10
BP3
C11
C12
C13
HD2
J1
+

Bild **12**

fiele in diesem Fall der Verschleiß, denn es wäre keine Erneuerung der nach 2,75 Jahren verbrauchten Röhren erforderlich.

10.2.3. Die mittlere Funktionsdauer von Geräten

Aus Abschnitt 10.2.2. war ersichtlich, daß bei exaktem Aufbau auch Amateurgeräte eine sehr gute Zuverlässigkeit aufweisen müßten. Das ist natürlich schon bedingt durch die relativ geringe Bauelementezahl.
Abschließend nun noch einen Überblick über die zu erwartenden Zeiten für Amateurgeräte. Dabei ist zu berücksichtigen, daß zum vollen Betrieb einer Funkstation mehrere Geräte erforderlich sind und daher infolge der Addition die Gesamtausfallrate und entsprechend die Ausfallzeiten geringer werden. Die Zeiten sind für

Kurzwellenempfänger mit Röhren	3 600 h
Kurzwellenempfänger mit Transistoren	10 000 h
Konverter mit Röhren (2-m-Band)	20 000 h
Konverter mit Transistoren	50 000 h
Sender, 10-m- bis 80-m-Band ($P_0 = 50$ W)	2 770 h
Modulationsverstärker, dazu	
Interferenzwellenmesser	20 000 h
Oszillograf	5 000 h
Röhrenvoltmeter	17 000 h
Tongenerator	5 000 h
Netzgerät mit Selengleichrichter	50 000 h

11. Auswertung von Prüfergebnissen

Diese Ausführungen sollen nicht ohne einige Hinweise zur Auswertung von Prüfergebnissen schließen. Wer sich umfassender informieren möchte, muß die entsprechende Literatur einsehen.

11.1. Ermittlung von Parametern verschleißbehafteter Bauelemente

In den Gl. (9) und Gl. (10) wurden die allgemeinen Beziehungen zu Mittelwert und Standardabweichung gebracht. Die Werte, die die Gesamtheit der Exemplare eines Loses darstellen, weichen um so mehr von den durch Stichproben ermittelten Werten nach den angegebenen Gleichungen ab, je weniger Meßwerte man hat.
In der mathematischen Statistik gibt es unterschiedliche Verfahren, die Anzahl der Prüfwerte entsprechend auszuwerten. Sie lassen sich an dieser Stelle nicht näher erläutern. Uns kommt es auch nicht in dem Maß darauf an, daß wir für den Mittelwert eine noch genauere oder realistischere Zahl feststellen. Die mit Gl. (9) und Gl. (10) ermittelten Werte genügen für unsere Berechnungen als gute Informationsgröße. Daß das Ergebnis in bestimmten, gewünschten Grenzen liegt, wird gewährleistet, indem wir den Toleranzbereich um den Mittelwert mit $\pm 3\,\sigma$ einsetzen. Will man unbedingte Garantien, so haben wir noch die Möglichkeit, eine Zeit von

$$T = M - 3\,\sigma \tag{42}$$

anzugeben, weil dann mit größter Wahrscheinlichkeit alle Zeiten höher liegen als T. Es gibt natürlich auch eine Wahrscheinlichkeit, die besagt, daß Werte von M möglich sind, die $M + 3\,\sigma$ ergeben. Das bedeutet beispielsweise: Eine Röhre fällt erst nach 2 000 h $+ 3\,\sigma$ aus. Aber die Wahrscheinlichkeit dafür ist $< 10\,\%$ (Diagramm 13, S. 85)!

11.2. Ermittlung der Frühausfälle

Was unter Frühausfällen zu verstehen ist, wurde bereits erläutert (Abschnitt 2.4.1.), ebenso, daß der Hersteller von Geräten die Einbrennzeit ökonomisch ansetzen muß. Die Parameter der *Weibull*-Verteilung (α) geben hierüber Aufschluß. Systeme, die eine mittlere Funktionsdauer zwischen 100 h und 1 500 h haben, sollte man etwa 0,1 t_p „einbrennen", bevor sie ausgeliefert werden. Stellt man dabei jedoch fest, daß in der Zeit 0,01 bis 0,1 t_p mehr als 2 Ausfälle vorkommen, dann ist etwas Grundsätzliches am Exemplar nicht in Ordnung. Eine Auslieferung kann in diesem Fall bis zur Klärung nicht stattfinden.

11.3. Ermittlung der praktischen Funktionsdauer

Obgleich es den Benutzer im praktischen Betrieb nicht interessiert, durch welche Ursache das Erzeugnis ausfällt, müssen wir doch bei der Auswertung von Prüfergebnissen unterscheiden, ob der Ausfall infolge mangelnder Wartung geschah (z. B. Verschleiß eines Bauelements) oder ob ein echter plötzlicher Ausfall vorliegt.
Es werden nun eine Anzahl von n-Prüflingen aus einem Los den Prüfbedingungen ausgesetzt. Frühausfälle sollten nach Möglichkeit also nicht mehr vorhanden sein. Man betreibt die Exemplare gleichzeitig. Die Betriebszeitabschnitte zwischen den Ausfällen werden registriert. Die Zeit ist damit

$$T_A = \sum_{i=1}^{f} t_i \; ; \tag{43}$$

f — Anzahl der Ausfälle.

Bei reparierbaren Prüflingen können nach den Ausfällen Reparaturen durchgeführt werden. Allgemein sieht man allerdings für Geräte intermittierenden Betrieb vor. Sind Ausschaltungen vorzunehmen, so muß man die wirklichen Betriebszeiten addieren. Diese Tests können mit relativ großem Prüfaufwand verbunden sein, denn ein schnelles Ergebnis

erhält man natürlich, wenn entsprechend viele Prüflinge Verwendung finden. Dazu kommt der Vorteil, daß man weiß: Was für die einzelnen Prüflinge gilt, wird auch das gesamte System bestimmen. Bei der Auswertung des Verhältnisses der praktischen mittleren Funktionsdauer zur theoretischen mittleren Funktionsdauer $\frac{t_p}{t_r}$ ist es außerdem günstig, wenn sich die Ausfälle auf möglichst zahlreiche Exemplare verteilen. Dadurch ist sozusagen eine *Zeitraffung* möglich. Je weniger Prüflinge man hat, eine um so höhere praktische mittlere Funktionsdauer muß man nachweisen, d. h., damit steigt die Gefahr der Abweichung. Unter den Prüflingen kann es Exemplare geben, die während des gesamten Tests überhaupt nicht ausfallen. Eine solche erfreuliche Tatsache wirkt sich natürlich auf t_p aus. Die Ausfälle bei einigen Mustern während des Tests sind mit ihren Zeiten ebenfalls zu berücksichtigen. Danach addiert man die Betriebszeiten sämtlicher Prüflinge und dividiert die Zeit durch die Anzahl aller Ausfälle. Damit steht t_p fest, denn es ergibt sich

$$t_p = \frac{n \cdot T_{Test}}{\Sigma f} . \tag{44}$$

Wie können sich nun diese Zeiten zusammensetzen? Nehmen wir an, die Verhältnisse treffen für n-x der Stichprobe zu. Also bedeutet z. B. für Prüfling 1

$$T_{Test} = \sum_{i=1}^{p} t_i \tag{45}$$

die Summe seiner Betriebszeitabschnitte bis zum p-ten Ausfall und zugleich das Testende. Hingegen für Prüfling 2 ist

$$T_{Test} = \sum_{i=1}^{q} t_i + T_{Dif} , \tag{46}$$

worin T_{Dif} die Zeit vom letzten Ausfall bis zur Beendigung des Tests bedeutet.

Schließlich besteht noch die Möglichkeit, daß es Prüflinge gibt, die keinerlei Ausfälle hatten, somit wird

$$T_{Test} = t_n . \tag{47}$$

Nachdem man t_p durch Gl. (44) ermittelt und ins Verhältnis mit t_r gesetzt hat, läßt sich aus Diagramm 22 ablesen, mit welcher statistischen Sicherheit (in diesem Fall 90 %) t_p mit t_r übereinstimmt.

Da die Güte des Produkts nach der Höhe von t_p beurteilt wird, sollte t_p möglichst oberhalb des Kurvenzugs in Diagramm 22 liegen. Ergibt sich beispielsweise ein t_r von 500 h, so müßte man bei 10 Ausfällen $t_p = 500/0{,}7 = 715$ h haben.

12. Übersicht der verwendeten Formelzeichen

W	Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses
W'	Wahrscheinlichkeit für das Nichteintreten eines Ereignisses
W (t)	Wahrscheinlichkeit als Funktion der Zeit
φ (t)	Verteilungsfunktion
f (t)	Wahrscheinlichkeitsdichte
R (t)	Zuverlässigkeit
R_i (t)	Zuverlässigkeit des i. Systems
R_s (t)	Zuverlässigkeit einer Serienschaltung
R_p (t)	Zuverlässigkeit einer Parallelschaltung
$R(t)_{r,m,k}$	Zuverlässigkeit redundanter Anordnungen
F (t)	Unzuverlässigkeit
λ (t)	Ausfallrate, allgemein
λ	Ausfallrate unter bestimmten Bedingungen
λ_N	Ausfallrate unter Nennbedingungen
λ_{ges}	gesamte Ausfallrate
λ_i	Ausfallrate des i. Teiles
$\lambda(t)_p$	Ausfallrate redundanter Anordnungen
t	Betriebszeit allgemein
t_x	Betriebszeit bis zu einem bestimmten Zeitpunkt
t_r	theoretische mittlere Funktionsdauer
t_p	praktische mittlere Funktionsdauer
t_0	Funktionsdauer bei redundanten Anordnungen
t_i	Ausfallzeit des i. Elements
T	Bezugsgröße für konstanten Zeitabschnitt; sonstiger Zeitabschnitt
M	mittlere Lebensdauer verschleißbehafteter Elemente (zur weiteren Kennzeichnung auch mit Index)
σ	Standardabweichung
n, N	Anzahl von Prüflingen
$f_1 \ldots f_n$	Funktionen von Umgebungsbedingungen und Lastverhältnissen
α	Parameter der *Weibull*-Verteilung (Zeitabschnitt)
Σ	Summe aller ...
K	Einsatzbedingungen in der Anwendung
V_k	Verfügbarkeit
g	Faktor im Zusammenhang mit V_k
a, b,	Faktoren im Zusammenhang mit der Ausfallrate
LD	Lebensdauer (auch mit Index)
ϑ	Temperatur (auch mit Index)
γ	Sicherheitsfaktor

13. Erläuterungen zu den Diagrammen

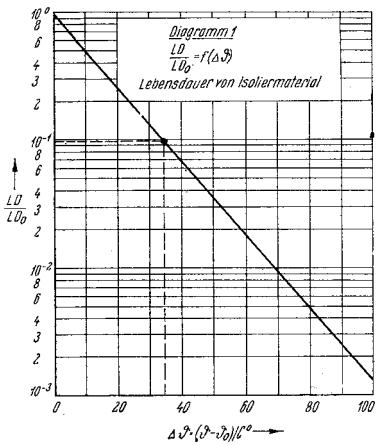


Diagramm 13.1. Lebensdauer von Isoliermaterial
Verändert man z. B. die Umgebungstemperatur des Isoliermaterials (Hartpapier) um etwa 35 °C, dann ist eine Abnahme der Lebensdauer von 0,1 der ursprünglichen zu erwarten.

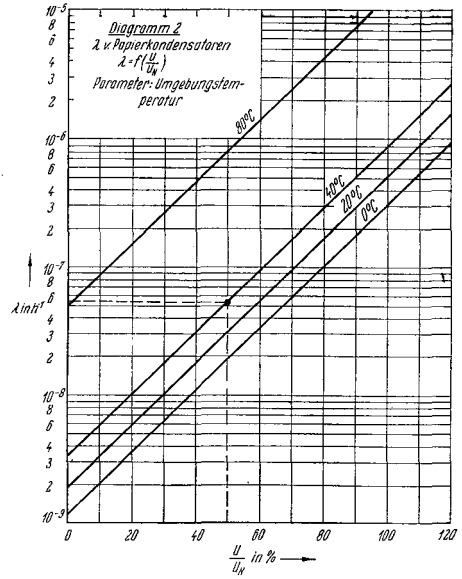


Diagramm 2
λ v. Papierkondensatoren
λ = f(U/U_N)
Parameter: Umgebungstemperatur
90°C
40°C
20°C
0°C
λ in h⁻¹
U/U_N in % ⟶

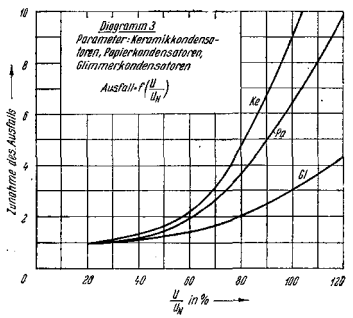


Diagramm 3
Parameter: Keramikkondensatoren, Papierkondensatoren, Glimmerkondensatoren
Ausfall = f(U/U_N)
Ke
Pa
Gl
Zunahme des Ausfalls
U/U_N in % ⟶

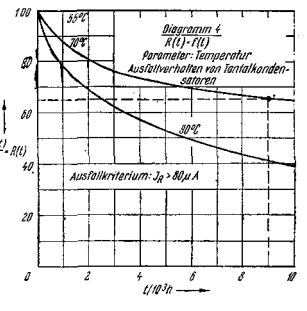


Diagramm 4
R(t) = f(t)
Parameter: Temperatur
Ausfallverhalten von Tantalkondensatoren
85°C
70°C
30°C
R(t)/N₀ = R(t)
Ausfallkriterium: J_R > 80 µA
t/10³h ⟶

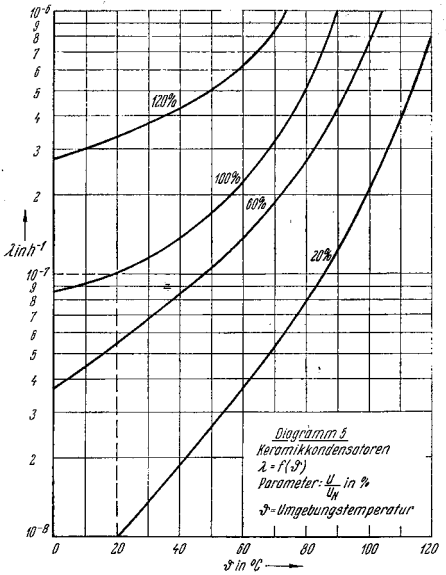


Diagramm 13.2. Die Ausfallrate von Papierkondensatoren
In Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses $\frac{U}{U_N}$ ergibt sich eine Veränderung von λ. Für $\frac{U}{U_N} = 50\,\%$ hätte man danach bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C etwa $5{,}5 \cdot 10^{-8}\mathrm{h}^{-1}$.

Diagramm 13.3. Zunahme des Ausfalls
Praktische Ergebnisse bewiesen eine Veränderung des Ausfallverhaltens von Kondensatoren bei konstanter Temperatur. Bei Papierkondensatoren ist eine Zunahme des Ausfalls um den Faktor 5 möglich, wenn $\frac{U}{U_N}$ von 10% auf 90 % verändert wird.

Diagramm 13.4. Ausfallverhalten von Tantalkondensatoren
Der Bestand eines Kollektivs von Tantalkondensatoren hat sich nach 9 000 h auf 65 % verringert.

Diagramm 13.5. Ausfallrate von Keramikkondensatoren
Unter Nennbedingungen erhält man für $\lambda = 10^{-7}\mathrm{h}^{-1}$.

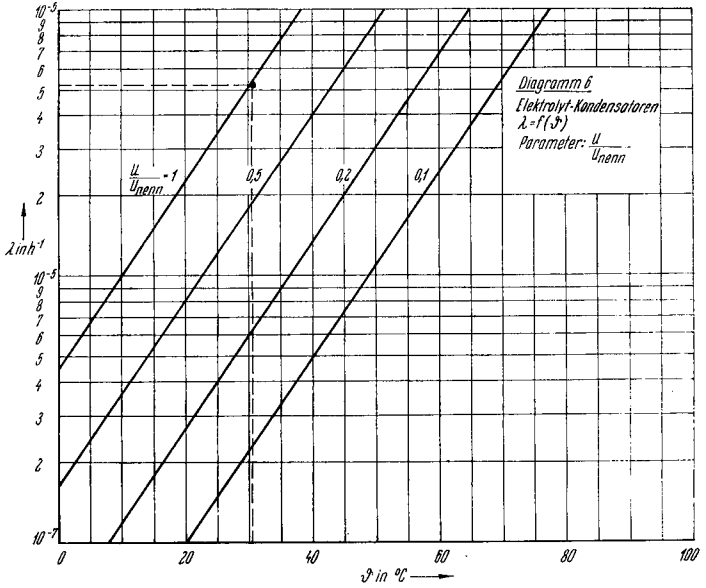


Diagramm 13.6. Ausfallrate von Elektrolytkondensatoren In Abhängigkeit der Umgebungstemperatur ergibt sich beispielsweise für $\frac{U}{U_N}\left(\frac{U}{U_{nenn}}\right) = 100\,\%$ und 30 °C für $\lambda = 5 \cdot 10^{-6} h^{-1}$.

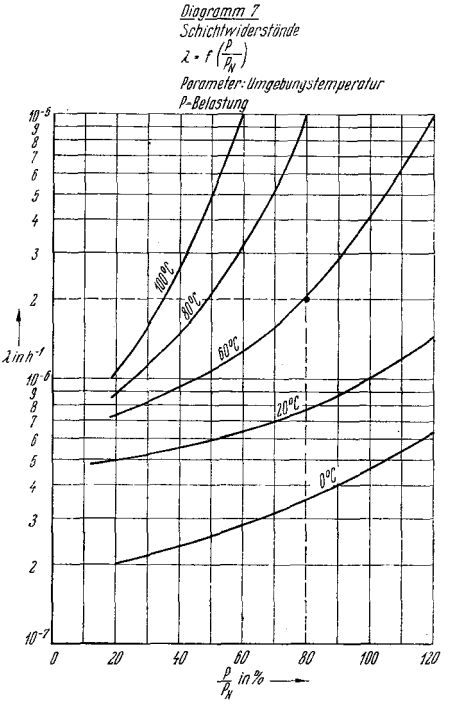
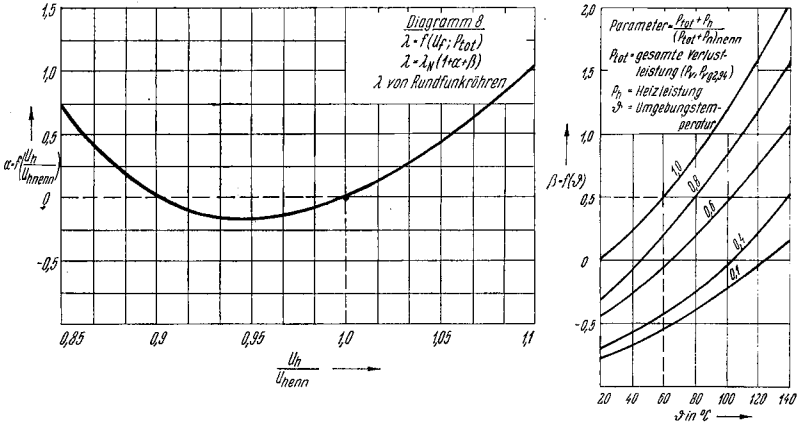


Diagramm 13.7. Ausfallrate von Schichtwiderständen
Bei einer Umgebungstemperatur von 60 °C und einer Belastung $\frac{P}{P_N} = 80\,\%$ wird $\lambda = 2 \cdot 10^{-6} h^{-1}$.

Diagramm 13.8.
Die Ausfallrate von Rundfunkröhren
Mit einer Heizspannung $\frac{U_h}{U_{hnenn}} = 1$ ist $\alpha = 0$, und mit der vollen Ausschöpfung der Verlustleistungen einer Pentode wird bei 60 °C Umgebungstemperatur $\beta = 0{,}5$. Also ändert sich α gegenüber Nennbedingungen um den Faktor 1,5.



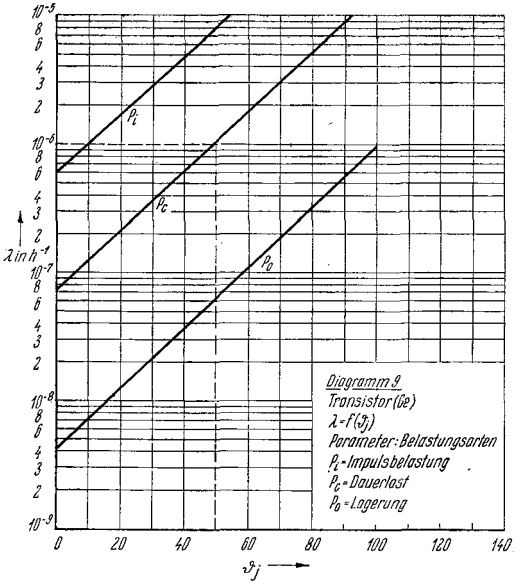


Diagramm 13.9. Die Ausfallrate von Germaniumtransistoren
Eine Kristalltemperatur von 50 °C hätte bei Dauerbetrieb eines Germaniumtransistors eine mittlere Ausfallrate von $\lambda = 10^{-6}h^{-1}$ zur Folge.

Diagramm 13.10. Die Betriebszuverlässigkeit der Serienschaltung
Für 10 in Serie geschaltete Einheiten wird die resultierende Zuverlässigkeit 90 %, wenn die der Einheiten je 99 % beträgt.

Diagramm 13.11. Die mögliche Anzahl von Elementen für eine zu erzielende mittlere Funktionsdauer
Will man ein $t_r = 500$ h erreichen und hat in einer Serienschaltung einen Mittelwert von $10^{-6}h^{-1}$ der Ausfallrate aller beteiligten Elemente, so könnte man 2000 Stück verwenden.

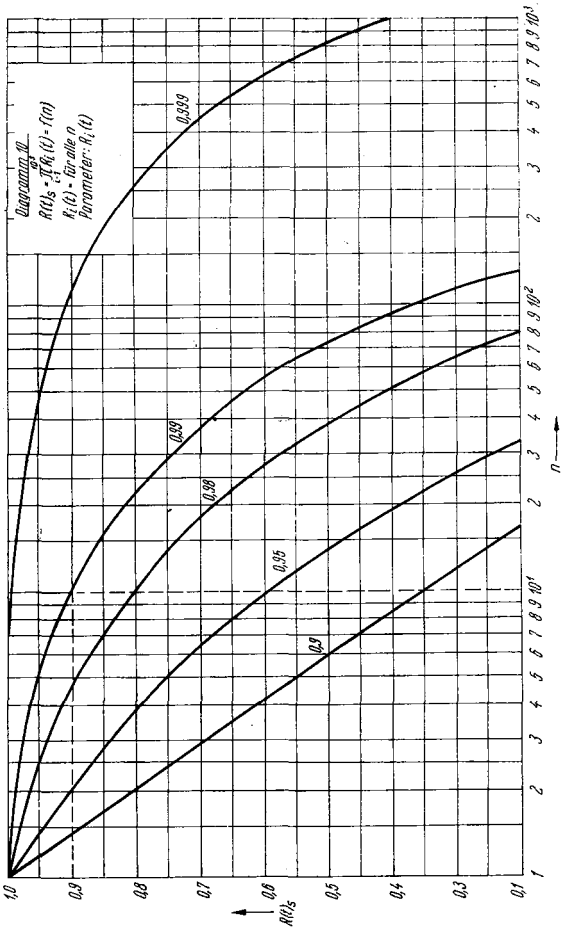


Diagramm 10
$R(t)_s = \prod_{i=1}^{10^3} R_i(t) = f(n)$
$R_i(t)$ - für alle n
Parameter: $R_i(t)$
0,999
0,99
0,98
0,95
0,9
$R(t)_s$
n

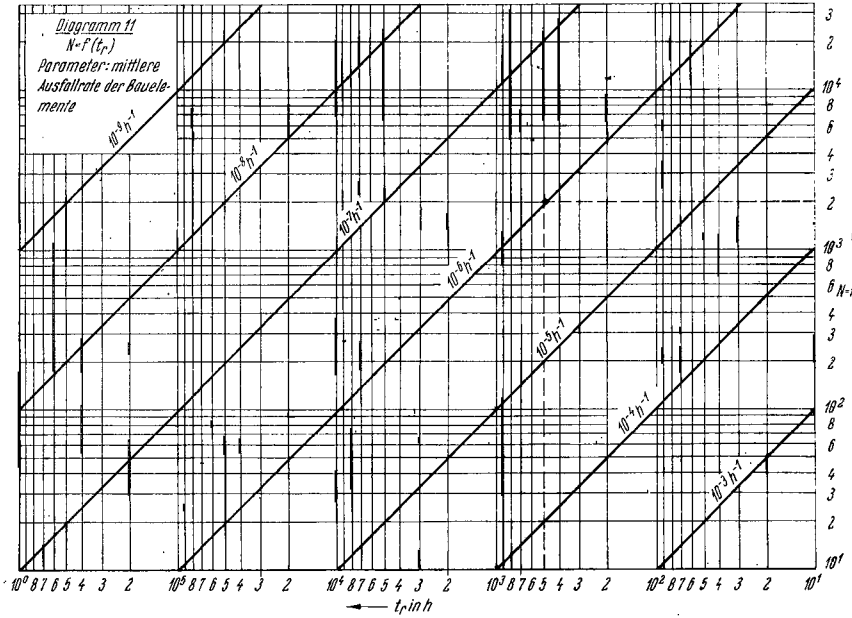


Diagramm 11
N=f(tr)
Parameter: mittlere Ausfallrate der Bauelemente
10⁻⁵h⁻¹
10⁻⁵h⁻¹
10⁻⁵h⁻¹
10⁻⁵h⁻¹
10⁻⁵h⁻¹
10⁻⁴h⁻¹
10⁻³h⁻¹
N=f(tr)
tr in h

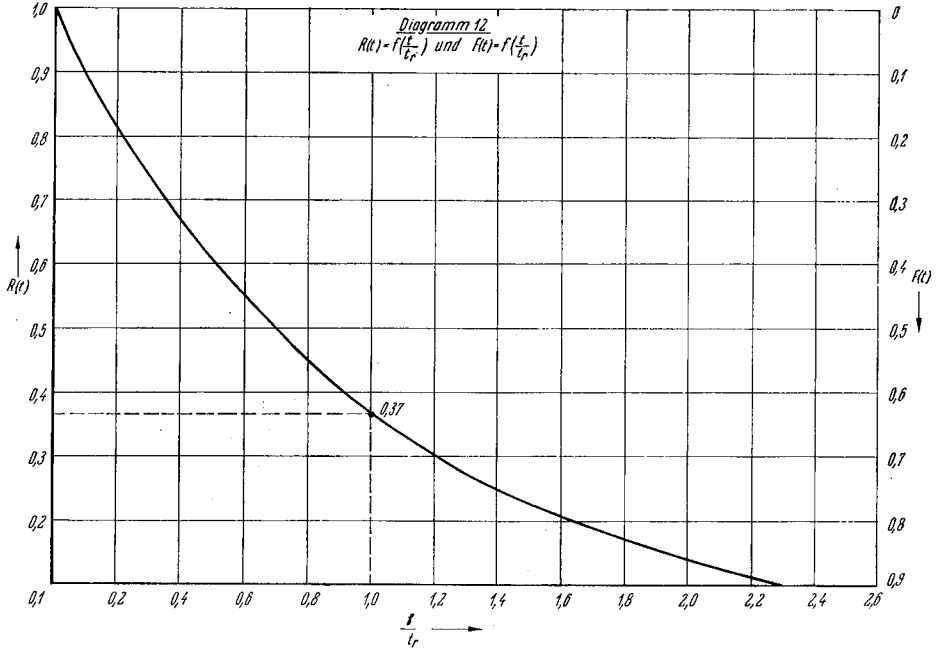


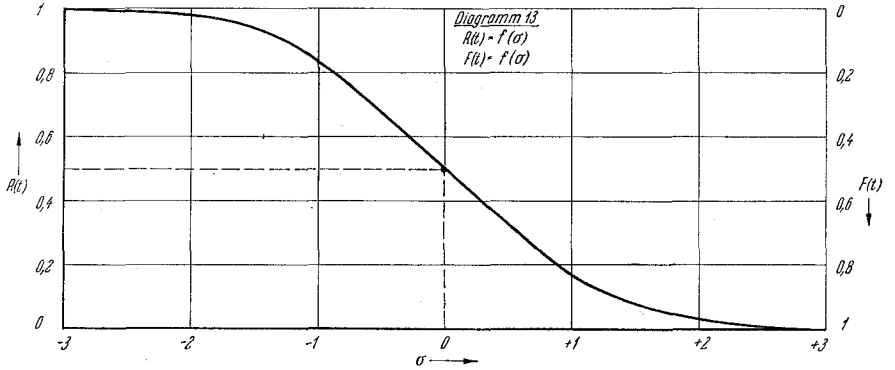
Diagramm 12
R(t) = f(t/tr) und F(t) = f(t/tr)
R(t)
F(t)
0,37
t/tr
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
2,2
2,4
2,6

Diagramm 13.12. Die Betriebszuverlässigkeit als Funktion von $\frac{t}{t_r}$

Dieses Diagramm kann als Leitbild der Zuverlässigkeitstheorie gelten. Wenn $\frac{t}{t_r} = 1$ ist, so ergibt sich für eine Serienschaltung hinsichtlich Zufallsausfällen eine Zuverlässigkeit von 37 % oder eine Unzuverlässigkeit von 63 %.

Diagramm 13.13. Die Betriebszuverlässigkeit verschleißbehafteter Elemente

Die Zuverlässigkeit verschleißbehafteter Elemente ist bei der vollen Ausschöpfung der mittleren Lebensdauer nur 50 %. Würde man dagegen den Zeitpunkt $M = 3\sigma$ betrachten, dann wäre $R(t) = 99{,}7\ \%$.



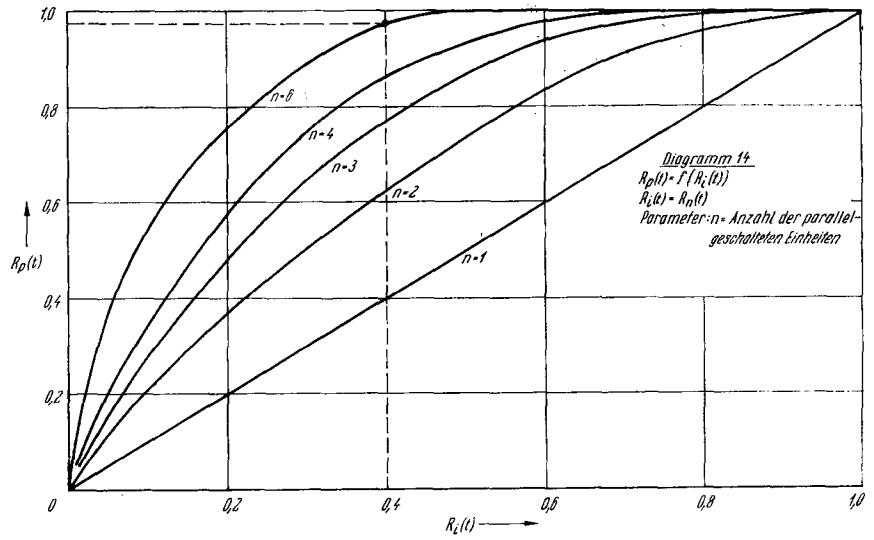
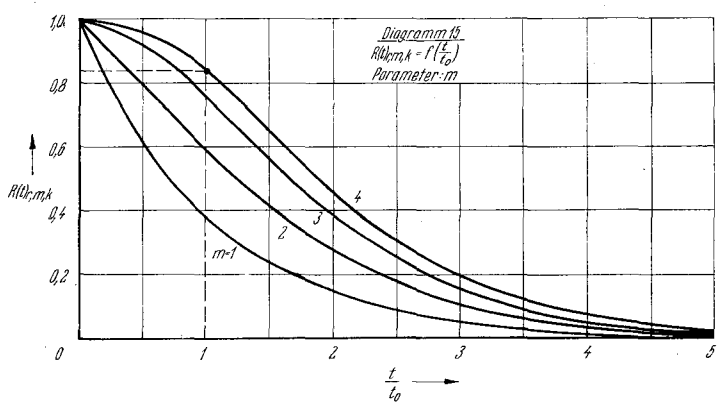

1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
$R_p(t)$
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
$R_L(t)$
n=6
n=4
n=3
n=2
n=1
Diagramm 14
$R_p(t) = f(R_i(t))$
$R_i(t) = R_n(t)$
Parameter: n= Anzahl der parallel-
geschalteten Einheiten

Diagramm 13.14.
Die Betriebszuverlässigkeit der Parallelschaltung
Die 6fache Parallelschaltung im Zuverlässigkeitssinn ergibt eine Gesamtzuverlässigkeit = 96 %, obgleich die einer einzelnen Anordnung nur 40 % beträgt.

Diagramm 13.15.
Die Betriebszuverlässigkeit redundanter Anordnungen
Obgleich eine Parallelschaltung eine redundante Anordnung ist, wird in diesem Diagramm davon ausgegangen, daß die Zuverlässigkeit der Einzelanordnung eine exponentielle Abhängigkeit aufweist. Für $\frac{t}{t_0} = 1$ ist $R\,(t)_{r,m,k} = 84\,\%$, wenn $m = 4$.



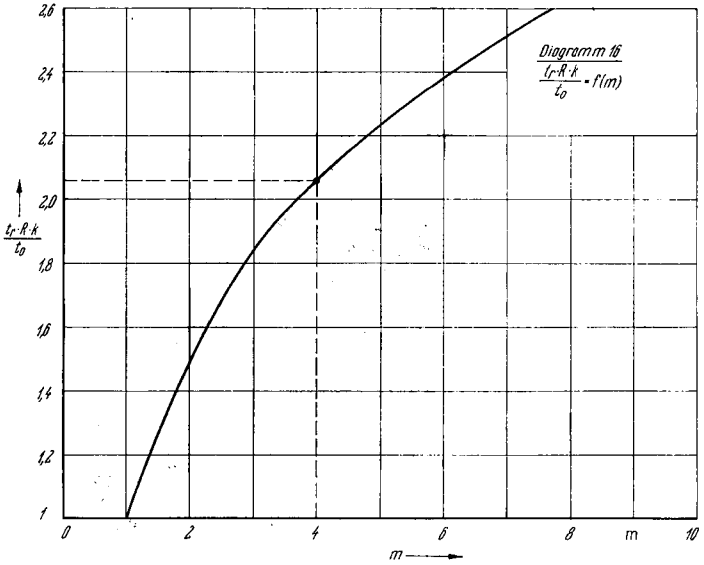


Diagramm 13.16.
Die Erhöhung der mittleren Funktionsdauer
Infolge heißer Reserve erhält man eine Erhöhung der mittleren Funktionsdauer je nach der Anzahl der redundanten Einheiten. Mit m = 4 steigt t_r um mehr als das Doppelte (bitte im Bild statt „k" einsetzen „g").

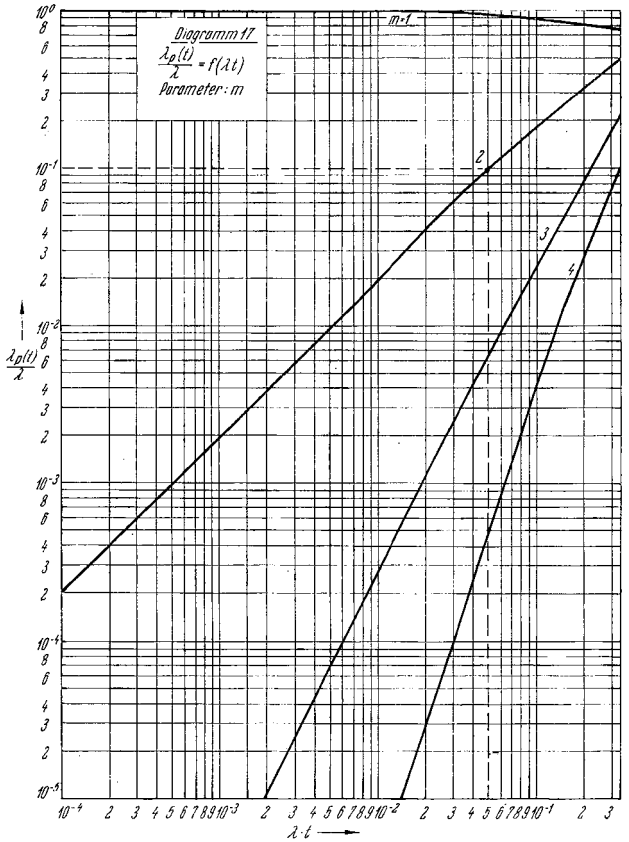


Diagramm 13.17. Die Ausfallrate redundanter Anordnungen
Ist $\lambda t \leqq 0{,}1$, so vereinfacht sich die Ermittlung der Ausfallrate. Beispielsweise hätte man eine Verringerung von λ_p um den Faktor 10, wenn m = 2 ist.

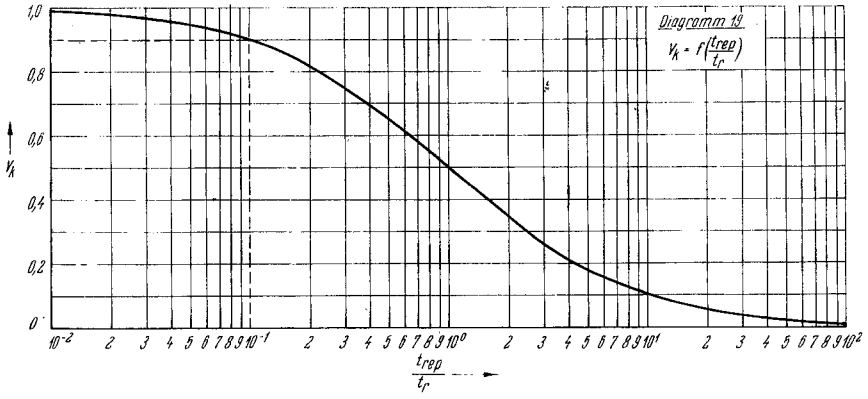
Diagramm 18
$\frac{R_a^*}{R_a} = f(R_i/R_a)$
Parameter: a
a=2
1,5
1,33
$\frac{R_a^*}{R_a}$
$\frac{R_i}{R_a}$

Diagramm 13.18. Dimensionierung redundanter Widerstände

Entsprechend dem Innenwiderstand der Gleichstromquelle zu ihrem Lastwiderstand sind die redundanten Widerstände zu dimensionieren. Es darf bei Ausfall eines Widerstands keiner der übriggebliebenen Widerstände infolge Überlast ausfallen. Man muß also z. B. mit m = 3 (was a = 1,5 entspricht) für $\frac{R_i}{R_a}$ jeden Widerstand so auslegen, daß er das 1,3fache der gesamten Last aushält.

Diagramm 13.19. Die theoretische Verfügbarkeit

Bei der Entwicklung und Projektierung von Systemen muß man die Möglichkeiten des Service unbedingt berücksichtigen. Denn es kann sonst vorkommen, daß trotzdem keine zuverlässige Anlage zur Verfügung steht. Man hat eine Verfügbarkeit von 90 %, wenn $\frac{t_{rep}}{t_r} = 0{,}1$ ist.



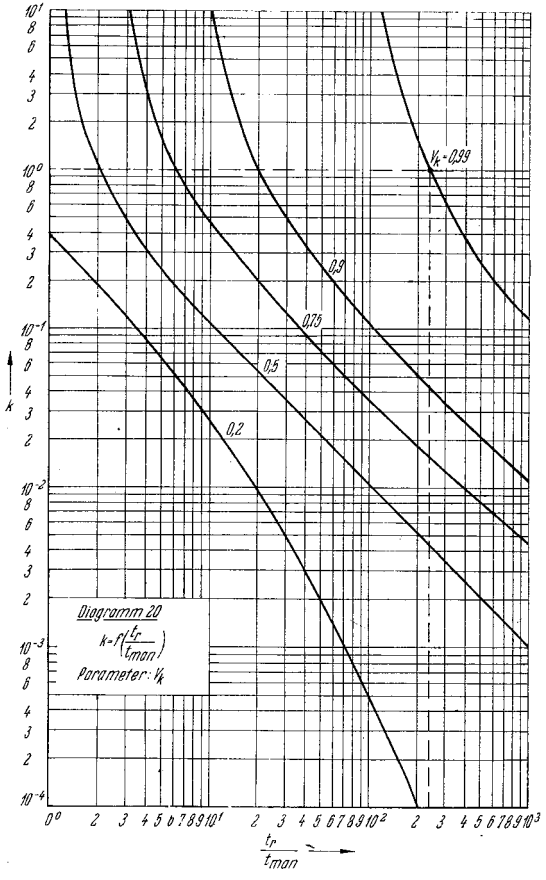


Diagramm 13.20. Die mittlere Funktionsdauer als Funktion der Reparaturzeit

Um eine Verfügbarkeit von 99 % zu erreichen, ist bei einer gesamten Reparaturzeit von 10 h eine mittlere Funktionsdauer von 1000 h erforderlich (bitte im Bild statt „k" zweimal einsetzen „g").

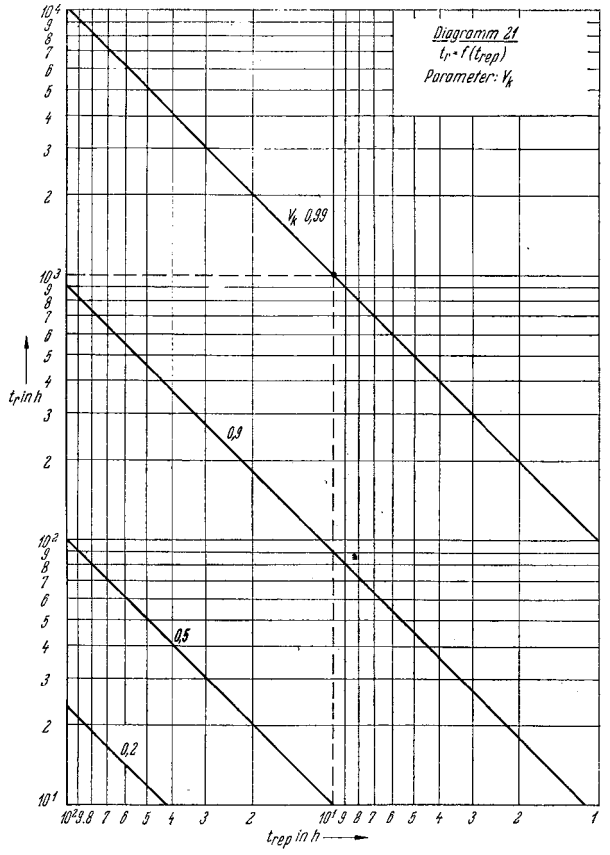


Diagramm 13.21. Die mittlere Funktionsdauer als Funktion der Reparaturzeit

Um eine Verfügbarkeit von 99 % zu erreichen, ist bei einer gesamten Reparaturzeit von 10 h eine mittlere Funktionsdauer von 1000 h erforderlich.

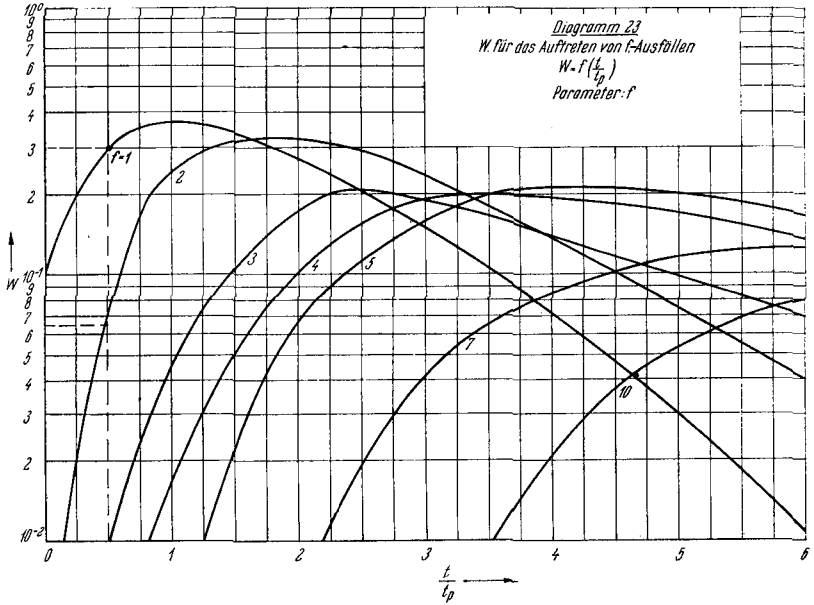
Diagramm 22
$\frac{\tau_c}{\varphi} = \varphi(f)$
Statistische Sicherheit S = 90%
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0
10
20
26
f
$\frac{\tau_c}{\varphi}$

Diagramm 13.22. Auswertung von Prüfergebnissen

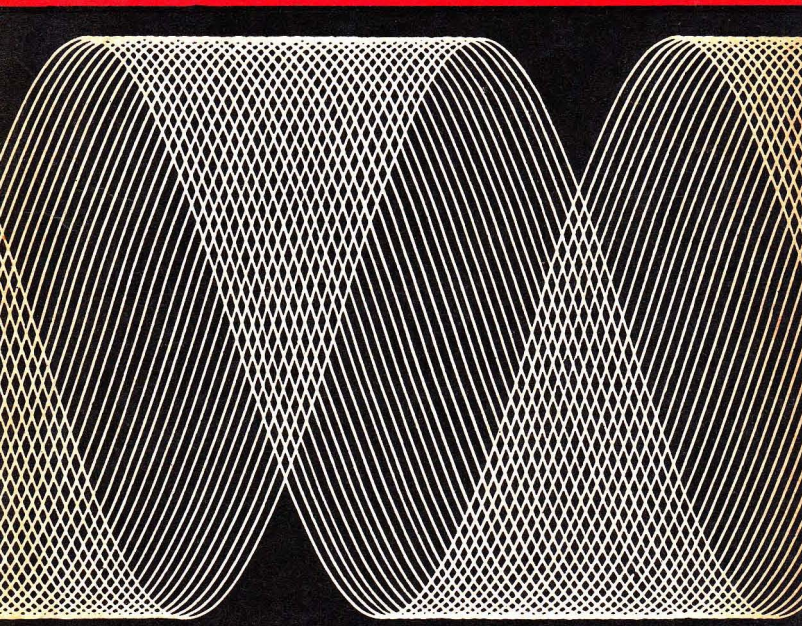
Zum Nachweis einer bestimmten praktischen mittleren Funktionsdauer gegenüber der theoretischen Zeit kann man mit einer gewissen Sicherheit auf Grund der Ausfälle auf das Verhalten des Kollektivs schließen. Hat man z. B. 10 Ausfälle mit einem mittleren Zeitabstand t_p, dann gilt t_r *als erwiesen, wenn* $t_p \geqq 1{,}43\ t_r$.

Diagramm 13.23. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Ausfällen

Bei einer Zeit von $t = 0{,}5\ t_p$ kann man mit $W = 6{,}5\ \%$ damit rechnen, daß 2 Ausfälle vorkommen. Für einen Ausfall *ist* W *auf 30 % ange*stiegen.



14. Literaturhinweise

Autorenkollektiv	*Kleine Enzyklopädie*, VEB Bibliographisches Institut
Bazovski	*Confidence Limits — Reliability and Practice*, Prentice-Hall Inc., Englewood, Chiffs, New Jersey 1961
Enrick, L.	*Einfache statistische Verfahren der Zuverlässigkeitssicherung*, Technische Zuverlässigkeit, H. 7, R. Oldenbourg Verlag München
Epstein, B.	*Estimation From Life Data*, Transaction R QC-9, 1960
Fründt, H. J.	*Die Unzuverlässigkeit elektronischer Geräte*, NTZ, 1960, H. 11
Guyot	*Wartung elektronischer Anlagen*, L'Onde Électronique 43 (1963) Sep.
Henney	*Reliability Factors for Ground Electronic*, New York 1956
Kanno, A.	*Zuverlässigkeit von Nachrichtengeräten*, Technische Zuverlässigkeit, H. 9, R. Oldenbourg Verlag München
Störmer, H.	*Über die Zuverlässigkeit von Anlagen mit Reservebauelementen*, REÜ 16 (1962) 7
Tretter, J.	*Die Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit*, Fernmeldepraxis, April 1960
Wilde, H.	*Die Bestimmung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer*, ATM, Mai 1962

80